

Charakterisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe mittels laserinduzierter Fluoreszenz

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der

Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation

von

Stefan Wigger
aus
Ahaus

Gutachter: Prof. Dr. Christof Schulz
Prof. Dr. Sebastian Kaiser
Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2014

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Doktorandenzeit am Daimler Research & Development Zentrum in Ulm. Die universitäre Betreuung erfolgte am Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Christof Schulz für sein Vertrauen, die zahlreichen Ratschläge und konstruktiven Diskussionen bedanken. Herrn Prof. Dr. Sebastian Kaiser danke ich für die Übernahme des Koreferats und insbesondere für die unverzichtbare fachliche Unterstützung. Herrn Dr. Daniel Fuhrmann danke ich für seine Unterstützung bei der Entwicklung der Messtechnik.

Seitens der Daimler AG danke ich vor allem Herrn Dr. Hans-Jürgen Füber für das mir entgegengebrachte Vertrauen und seine Unterstützung nicht nur in fachlichen Angelegenheiten. Herrn Dr. Matthias Martin verdanke ich zahlreiche fachliche Diskussionen die zum tieferen Verständnis der Kolbenringfunktion beigetragen haben. Für die Unterstützung bei den Tribometer- und Kontaktwinkelmessungen danke ich Frau Dr. Juyeong An. Für seinen unermüdlichen Einsatz beim Aufbau des optisch zugänglichen Einzylindermotors danke ich Herrn Tobias Hanschke. Den Kollegen Guntmar Schulz, Erwin Löffler, Dr. Oliver Essig und Hans Reiss danke ich für die tatkräftige Unterstützung im Labor und am Motorprüfstand. Meinem Bachelorstudenten Herrn Felix Reyher danke ich für den Aufbau der Hochgeschwindigkeitsmesstechnik und der Durchführung der Versuche am RRV-Kolbenringtribometer.

Herrn Dr. Tian Tian vom Sloan Automotive Laboratory am MIT in Boston danke ich für den regen Informationsaustausch auf theoretischer und messtechnischer Ebene. Seinem ehemaligen Doktoranden Herrn Dr. Eric Senzer danke ich für die produktive Zusammenarbeit am optisch zugänglichen Motor des MIT.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung vor und während der Promotionszeit danken.

Ulm, im September 2014

Kurzfassung

Die Kolbengruppe des Verbrennungsmotors ist ein Dichtsystem in Relativbewegung, das im Spannungsfeld zwischen optimaler Dichtfunktion und niedrigen Reibungsverlusten steht. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrades ist eine Vorhersage des Systemverhaltens unmöglich. Die Arbeit widmet sich daher dem Aufbau und der Kalibrierung eines Messsystems zur optischen Charakterisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe basierend auf der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF). Öl wurde dazu in Spuren mit Laserfarbstoffen, hier im Wesentlichen Pyrromethen 567 und Rhodamin 640, versetzt. Die Farbstoffe werden mit einem Nd:YAG-Laser bei 532 nm angeregt und das Fluoreszenzlicht mittels einer CMOS-Kamera zweidimensional abgebildet. Während die qualitative Anwendung, teils auch in Motoren, bereits in der Literatur dokumentiert ist, besteht ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit in Methoden zur Quantifizierung.

Die optischen Eigenschaften der Messtechnik wurden dazu zunächst *ex-situ* in einer Kalibriervorrichtung untersucht. Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass metallische Hintergrundmaterialien über ihren unterschiedlichen Reflexionsgrad signifikant das Messsignal beeinflussen, die Oberflächenrauigkeit allerdings kaum. Anschließend erfolgten die Applikation an einem Kolbenringtribometer und die Entwicklung einer In-situ-Kalibrierung, die eine zweidimensionale Quantifizierung der Instrumentenfunktion des Messsystems einschließt. Dadurch konnte die Ölfilmdicke von etwa 2 μm im gesamten Kolbenringbereich auf 0,1 μm genau bestimmt werden. Ab etwa 8 m/s Gleitgeschwindigkeit zeigte der Ölfilm ein unstabiles Verhalten. Ein weiterentwickeltes hochrepetitives Messsystem ermöglichte die zeitliche Auflösung dieser dynamischen Prozesse im Schmierpalt. Durch den ergänzenden Einsatz einer alternativen, auf Totalreflexion basierenden Beleuchtungsmethode konnte ausschließlich das an der Laufbahnoberfläche haftende Öl sichtbar gemacht und eine Teilfüllung des Schmierpalt nachgewiesen werden. Die am Tribometer gewonnenen Erkenntnisse werden u.a. helfen, dreidimensionale Simulationsmodelle weiter zu entwickeln.

Zur Untersuchung der tribologischen Vorgänge in der gesamten Kolbengruppe wurde die LIF-Messtechnik ebenfalls an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor eingesetzt. Fenster in der Zylinderwand ermöglichen hier die Beobachtung der Kolbengruppe über den gesamten Hub. Öltransportvorgänge können so in Abhängigkeit der Motorbetriebsparameter untersucht werden. Die verschiedenen Reflexionsgrade der Kolbenoberfläche beeinflussen auch hier das Fluoreszenzsignal um nahezu den Faktor zwei, zudem variiert die Laser-Intensitätsverteilung von 60 – 100% über die gesamte Fensterfläche. Zur quantitativen Schichtdickenmessung kommt der Ermittlung der zweidimensionalen Systemantwort somit besondere Bedeutung zu. Dazu wurde die am Kolbenringtribometer entwickelte In-situ-Kalibrierung in modifizierter Form übertragen.

Die Interaktion von Kraftstoff und Öl in der Kolbengruppe führt zu Ölverdünnung und steht im Verdacht Vorentflammungen auszulösen. Die genaue Untersuchung dieser Vorgänge ist außerhalb des Rahmens dieser Arbeit, wohl aber wurden qualitative Voruntersuchungen hier durchgeführt. Zur Detektion von Kraftstoff mittels LIF-Messtechnik wurden Löslichkeit und Fluoreszenzintensität der Laserfarbstoffe in üblichen Kraftstoffen untersucht. Mit Pyrromethen 567 versetzter E10-Kraftstoff wurde als geeignet für die Untersuchung ermittelt. Damit gelang die Detektion der Kraftstoffverteilung auf der Zylinderwand und in der Kolbengruppe im gefeuerten Betrieb. Durch den nicht verdampfenden Farbstoff wird allerdings der Einfluss von Kraftstoffverdampfung auf das Fluoreszenzsignal nicht adäquat repräsentiert. Hier können weiterführende Arbeiten ansetzen, indem der Kraftstoff mit einem mitverdampfenden Fluoreszenzmarker versetzt wird.

Abstract

The design of the piston-ring area is caught between optimal sealing and low friction losses. Due to its complexity, an accurate prediction of the system behavior is still not possible. This thesis describes the development and calibration of an optical measurement system for the characterization of liquid films in the piston-ring area based on laser-induced fluorescence (LIF). The laser dyes pyrromethene 567 and rhodamine 640 were dissolved in oil and excited with an Nd:YAG-laser at 532 nm. The fluorescent light distribution was imaged by a CMOS camera. While the qualitative use of LIF for such purposes is well documented, the main contribution of this work is in the development of quantitative methods for LIF-measurements of oil-film thickness

In a first step, the fundamental optical properties of the optical system were investigated *ex-situ* in a calibration device. An important result of these experiments was that the surface reflectivity of the contact bodies strongly depends on the material, while surface roughness has only minor influence. Next, the method was used in a piston-ring tribometer. For this purpose, an in-situ calibration including the two-dimensional system response was developed. This allowed determining the oil-film thickness to be on the order of 2 μm with an accuracy of 0.1 μm . Above about 8 m/s sliding speed, the film is spatio-temporally unstable. To image the oil-film dynamics at high sliding speeds, a system with kHz frame rates was developed. An alternative method of illuminating the film based on total internal reflection enabled the exclusive visualization of oil-wetted areas. This provided evidence that the lubrication gap is only partially filled. The findings from the tribometer help to improve existing 3D simulation models of oil films.

The LIF-system was also used in an optically-accessible single-cylinder engine. Windows in the cylinder liner allowed imaging the whole piston-ring area over the entire stroke. This allowed investigating the oil-transport processes as a function of the engine operating conditions. Also in the case of the engine, the fluorescence signal varied by almost a factor of two due to different reflectivities of the various materials. Additionally, the distribution of laser intensity within the window area varied between 60 – 100%. Therefore, it was particularly important to quantify the two-dimensional optical system response, which was accomplished by modifying the in-situ calibration developed in the piston-ring tribometer.

The interaction of fuel and oil in the piston-ring area leads to oil dilution and is suspected to trigger low-speed pre-ignition events. Detailed investigation of the relevant processes is beyond the scope of this work, but some preliminary experiments were performed. In order to detect the fuel by LIF, the solubility of laser dyes in the fuel and the resulting fluorescence intensity were examined. Traces of pyrromethene 567 dissolved in E10-fuel were found most suitable. With this combination it was possible to detect fuel on the liner and in the piston-ring area in fired engine operation. However, the non-

volatile laser dyes are not suitable to represent the influence of fuel evaporation during the measurement. It is thus recommended to further investigate the use of co-evaporative tracers for this purpose.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	1
Nomenklatur	3
1 Einleitung.....	5
2 Die Tribologie der Kolbengruppe	7
2.1 Grundlagen der Tribologie.....	7
2.1.1 Mechanische Beanspruchung von Werkstoffen	7
2.1.2 Terminologie.....	8
2.1.3 Hydrodynamische Schmierung	12
2.1.4 Die Stribeckkurve.....	16
2.2 Das tribologische System der Kolbengruppe.....	17
2.2.1 Die Kolbengruppe	17
2.2.2 Die Zylinderwand	22
2.2.3 Motorenöle.....	25
2.3 Phänomene in der Kolbengruppe.....	29
3 Filmdickenmessung an Tribometern und Motoren	33
3.1 Filmdickenmessung mit laserinduzierter Fluoreszenz	33
3.1.1 Physikalische Grundlagen der Fluoreszenz	33
3.1.2 Stand der Technik.....	45
3.2 Alternativen zur laserinduzierten Fluoreszenz	51
3.2.1 Elektrische Messverfahren.....	51
3.2.2 Fluoreszenzfreie optische Verfahren.....	54
4 Aufbau der optischen Messtechnik	59
4.1 Auswahl des optischen Systems.....	59
4.1.1 Öl/Farbstoff-Mischung und optisches Filter	59
4.1.2 Optische Komponenten	62
4.2 Voruntersuchungen mit Hilfe der Kalibriervorrichtung.....	65
4.2.1 Der Aufbau der Kalibriervorrichtung	65
4.2.2 Spektrale Eigenschaften der Öl/Farbstoff-Mischung	69
4.2.3 Auswahl der Farbstoffkonzentration.....	70
4.2.4 Untersuchungen zur Laser-Pulsenergie.....	71

4.2.5	Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz	72
4.2.6	Einfluss des Reflexionsgrades des optischen Hintergrundes	74
5	Optische Analyse des Ölfilmverhaltens am RRV-Kolbenringtribometer	77
5.1	Aufbau und Funktion des RRV-Kolbenringtribometers	77
5.1.1	Mechanischer Aufbau	77
5.1.2	Festlegung der Betriebsparameter	79
5.1.3	Einfluss der Laufflächenmaterialien auf die Tribologie	81
5.2	Applikation der phasengekoppelten optischen Messtechnik	89
5.2.1	Optischer Zugang und Strahlführung	90
5.2.2	Versuchsvorbereitungen	94
5.2.3	Abschätzung der Messgenauigkeit	104
5.2.4	Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen	106
5.3	Weiterentwicklung der Messtechnik zur Hochgeschwindigkeitsmessung	114
5.3.1	Auswahl der optischen Komponenten	114
5.3.2	Applikation der Messtechnik am RRV-Kolbenringtribometer	116
5.3.3	Versuchsvorbereitungen	117
5.3.4	Abschätzung der Messgenauigkeit	125
5.3.5	Messergebnisse	128
6	Messungen am optisch zugänglichen Einzylindermotor	133
6.1	Aufbau und Funktion des Einzylindermotors	133
6.1.1	Mechanischer Aufbau und technische Daten	133
6.1.2	Optischer Zugang	135
6.2	Applikation des phasengekoppelten Messsystems	137
6.2.1	Strahlführung	137
6.2.2	Versuchsvorbereitung	140
6.2.3	Abschätzung der Messgenauigkeit	147
6.2.4	Funktionstest der LIF-Messung	148
6.2.5	Vorversuch Kraftstoffmessung	151
7	Ausblick	155
8	Zusammenfassung	157
	Literaturverzeichnis	161

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

BTBP	Fluoreszenzfarbstoff
CCD	Charge-coupled device (engl.), Bildsensorbauform
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor (engl.), Produktionsprozess
DLC	Diamond-like carbon (engl.), diamantähnlicher amorpher Kohlenstoff
FTP75	Federal Test Procedure 75 (engl.), Fahrzyklus zur Verbrauchsermittlung
GfT	Gesellschaft für Tribologie
HC	Hydrocarbons (engl.), Kohlenwasserstoffe
He-Cd	Helium-Cadmium (Laser)
HTHS	High temperature high shear (engl.), Ölkennwert
LC	Zusammenschaltung aus Induktivität (L) und Kapazität (C)
LDS	Lichtbogendrahtspritzen, thermisches Beschichtungsverfahren
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
LSPI	Low speed pre-ignition (engl.), Vorentflammung bei niedriger Drehzahl
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
Nd:YLF	Neodym-dotierter Yttrium-Lithium-Fluorid-Laser
PIV	Particle image velocimetry (engl.), Verfahren zur Strömungsanalyse
PKW	Personenkraftwagen
PTU	Programmable timing unit
PVD	Physical vapor deposition (engl.), Beschichtungsverfahren
RRV	Rotations-Reib-Verschleiß Tribometer
UV	Ultraviolettstrahlung
Xe	Xenon

Symbolverzeichnis

A	Fläche, in m^2
c_{cal}	Kalibrierfaktor, in counts/ μm
c	Lichtgeschwindigkeit, in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

c	Stoffmengenkonzentration, in $\frac{\text{mol}}{\text{l}}$
d	Schichtdicke in m
E	Energie, in J
F	Kraft, in N
h	Planck'sches Wirkungsquantum, $6,63 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
I	Strahlungsintensität, in $\frac{\text{W}}{\text{sr}}$
n	Brechungsindex
N	Anzahl
Q	Wärmeenergie, in J
R	Universelle Gaskonstante, in $8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$
t	Zeit, in s
T_λ	wellenlängenabhängige Transmission, in %
v	Geschwindigkeit, in m/s
Δx	Messunsicherheit
Φ_E	Strahlungsleistung, in W
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit, in s^{-1}
σ_x	Standardabweichung
μ	Reibkoeffizient
Ω	Raumwinkel, in sr
γ	Brechungswinkel, in $^\circ$
γ	Grenzflächenspannung, in N/m
ε	Extinktionskoeffizient, in $\frac{1}{\text{mol} \cdot \text{cm}}$
η	dynamische Viskosität, in $\text{mPa} \cdot \text{s}$
λ	Wellenlänge, in m
ν	Frequenz, in s^{-1}
ν	kinematische Viskosität, in mm^2/s
ρ	Dichte, in kg/m^3
τ	Scherspannung, in N/m^2
ϕ :	Fluoreszenz-Quantenausbeute, einheitenlos

1 Einleitung

Der Verbrennungsmotor hat nach über 100 Jahren Entwicklungsgeschichte einen hohen Reifegrad erreicht. In Verbindung mit flüssigen Kraftstoffen stellt er ein Antriebssystem mit hoher Energie- und Leistungsdichte zur Verfügung. Der Wunsch nach individueller Mobilität und die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe macht die Steigerung der Effizienz von Verbrennungsmotoren nach wie vor zum Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung.

Direkteinspritzung und Aufladung haben den Weg zu höheren Leistungsdichten eröffnet und den Trend hin zu kleineren Motoren in Abmessung und Hubraum (Downsizing) begründet. Durch Reduktion der Zylinderzahl und damit verbundener Entdrosselung der Teillast wird ein verbesserter Verbrauch bei vergleichbarer Leistung erreicht. Nebeneffekte wie erhöhter Brennraumdruck, Kraftstoff-Wandbenetzung oder Vorentflammungen sorgen dabei für neue Herausforderungen. Die Reduktion der innermotorischen Reibung bietet weiteres Potential zur Verbrauchseinsparung. Neben den Lagerstellen von Kurbel-, Nocken- und Ausgleichswellen ist die Kolbengruppe, bestehend aus dem Kolben sowie den Kolbenringen, zum Großteil für die innermotorischen Reibungsverluste verantwortlich. Gleichzeitig bildet die Kolbengruppe ein komplexes Dichtsystem in Relativbewegung. Die drei Fluide Motoröl, Kraftstoff sowie Brennraumgas interagieren durch Leckage oder direkte Vermischung (z.B. durch Direkteinspritzung von Kraftstoff) im Bereich der Kolbengruppe und führen so zu einer Reihe von unerwünschten Nebeneffekten wie Ölemission ins Abgas, Kraftstoffeintrag ins Motoröl, Arbeitsgasverlust oder Motorölschädigung durch Kraftstoff und Rußeintrag. Die Reduktion der Reibung bei Aufrechterhaltung der Dichtfunktion stellt somit einen Zielkonflikt bei der Weiterentwicklung der Kolbengruppe dar. Die Kolbenringe als eigentliche Dichtelemente, tragen hauptsächlich zu den Reibungsverlusten in der Kolbengruppe bei. Ihr Reibungs- und Verschleißverhalten wird maßgeblich durch die Verteilung des Schmiermittels zwischen Kolbenringlaufläche und Zylinderwand bestimmt. Das Gesamtsystem der Kolbengruppe mit seinen zahlreichen Komponenten ist ständig wechselnden Gas-, Reibungs- und Massenkräften ausgesetzt. Dieser hohe Komplexitätsgrad erschwert Prognosen des Systemverhaltens und macht eine genaue Analyse der Vorgänge notwendig.

Optische Methoden ermöglichen sowohl den detaillierten Blick in den Schmierspalt zwischen Kolbenring und Zylinderwand, als auch die Analyse des Gesamtsystems Kolbengruppe mit den auftretenden mechanischen Effekte wie beispielsweise Ringflattern, Ringkollaps oder der Fluidströmungen, bzw. deren Interaktion. Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) hat in bestehenden Arbeiten ihre Leistungsfähigkeit bei der Untersuchung von Öl- und Kraftstoffschichten in motorischen Anwendungen bewiesen und wird daher als Messmethode gewählt.

Die Analyse der optischen Eigenschaften der optischen Messtechnik mit Hilfe einer speziell angefertigten Kalibriervorrichtung steht am Anfang der Arbeit und bereitet die Basis für die Applikation der Messtechnik an den jeweiligen Versuchsträgern. Das Ziel ist hierbei, neben der qualitativen Schmierölverteilung auch deren Schichtdicke quantitativ zu erfassen. Dazu wird ein Kalibrierprozess für die optische Messtechnik entwickelt, der neben dem Reflexionsgrad der Materialoberflächen in der Kolbengruppe auch die Laserlichtverteilung an der Messstelle durch eine Flachfeldkorrektur berücksichtigt und so die Zuordnung von Fluoreszenzsignal und Schichtdicke erlaubt.

Die Applikation der optischen Messtechnik an einem Kolbenringtribometer ermöglicht schließlich die gezielte Untersuchung des Ölfilmverhaltens zwischen Kolbenring und Zylinderwand. Neben den Werkstoffen von Kolbenring und Zylinder können Gleitgeschwindigkeit, Normalkraft, Temperatur sowie Schmierstoffangebot als Versuchsparameter eingestellt werden. Ein phasengekoppeltes Messsystem erlaubt die genaue Ermittlung der Ölfilmstärke, ist jedoch auf eine Aufnahme pro Arbeitsspiel beschränkt, während ein Hochgeschwindigkeits-Messsystem die zeitlich hochaufgelöste Erfassung des Ölfilmverhaltens auch innerhalb des Arbeitsspiels ermöglicht.

Das phasengekoppelte System wird ebenfalls zur Systemanalyse an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor eingesetzt. Dieser basiert auf dem aufgeladenen, direkteinspritzenden Ottomotor M270/M274 von Daimler. Der optische Zugang zur Kolbengruppe erfolgt über Saphirfenster auf Druck- und Gegendruckseite in der Zylinderwand. Diese ermöglichen den Blick auf die Mantelfläche des Kolbens mit dem Ringfeld und dem Kolbenhemd. Die Höhe der Fenster ist so gewählt, dass die Kolbenringe während des kompletten Hubs das Sichtfeld nicht verlassen.

Zuletzt wird die Möglichkeit, den eingespritzten Kraftstoff ebenfalls mit dem bestehenden LIF-System zu detektieren, erprobt. Der Kraftstoff wird dazu mit einem Farbstoff fluoreszenzmarkiert, der auch bei der Ölmessung zum Einsatz kommt.

2 Die Tribologie der Kolbengruppe

Der Verbrennungsmotor stellt ein komplexes mechanisches System dar, dessen Bauteile einer Reihe von mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen ausgesetzt sind. Insbesondere der Kolben, der den Brennraum abdichtet und die Gaskraft in mechanische Arbeit umwandelt, ist besonders beansprucht. Zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß und zur Wärmeabfuhr kommt daher Öl als Schmier- und Kühlmittel zum Einsatz.

In diesem Kapitel werden die Grundbegriffe der Tribologie als Lehre von Reibung und Verschleiß, sowie die Kolbengruppe als System aus Kolben, Kolbenringen und Zylinderwand vorgestellt.

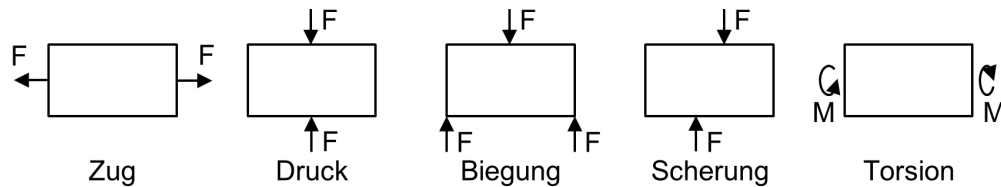
2.1 Grundlagen der Tribologie

Das Hauptaugenmerk bei der Weiterentwicklung der Kolbengruppe liegt auf der Reduzierung von Reibungsverlusten, die maßgeblich durch die mechanische Beanspruchung des Werkstoffs bestimmt werden und selbst zu diesen beitragen. Zu Beginn dieses Abschnitts werden daher die möglichen mechanischen Werkstoffbelastungen beschrieben. Darauf folgt eine Einführung in die relevanten Begriffe der Tribologie sowie der hydrodynamischen Schmierung.

2.1.1 Mechanische Beanspruchung von Werkstoffen

Um den störungsfreien und effizienten Betrieb einer Maschine oder technischen Einrichtung sicherstellen zu können, müssen die im Betrieb auftretenden mechanischen Belastungen bei deren Auslegung berücksichtigt werden. Diese können in zwei Kategorien unterteilt werden (siehe Abbildung 1).

Materialbelastungen



Oberflächenbelastungen

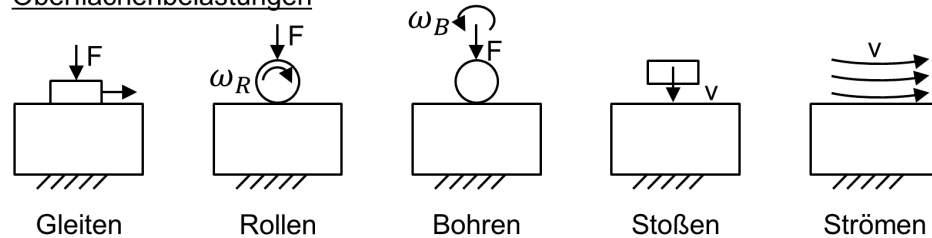


Abbildung 1: Übersicht möglicher mechanischer Belastungen nach [1]

Die *Materialbelastung* durch statische und dynamische Kräfte wirkt auf das gesamte Bauteil in Form von Zug-, Druck- und Scherspannungen. Diesen Belastungen widmet sich die Festigkeitslehre.

Die *Oberflächenbelastung* entsteht durch Kontakt und Relativbewegung mit einem Gegenkörper. Sie sind häufig verknüpft mit der Funktion eines Bauteils und somit unvermeidbar. Oberflächenbelastungen sorgen für Arbeitsverluste in Form von Reibung und beschädigen die Oberfläche durch Verschleiß. Den hierbei entstehenden Belastungen und Schäden widmet sich die Tribologie, deren wesentlichen Fachbegriffe im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.1.2 Terminologie

Im Folgenden erfolgt eine Definition der wichtigsten Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit tribologischen Fragestellungen. Aufgrund der kurzgefassten Definition wird hier wörtlich nach dem Arbeitsblatt 7 der Gesellschaft für Tribologie (GfT) [2] wiedergegeben.

Tribologie

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.“

Tribosystem

„Das tribologische System beinhaltet alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und ihre Eigenschaften mit den sich bei ihnen ergebenden“

den Veränderungen sowie die für die Beanspruchung charakteristischen Vorgänge und Größen.“ Vier Komponenten bilden das tribologische System (Abbildung 2):

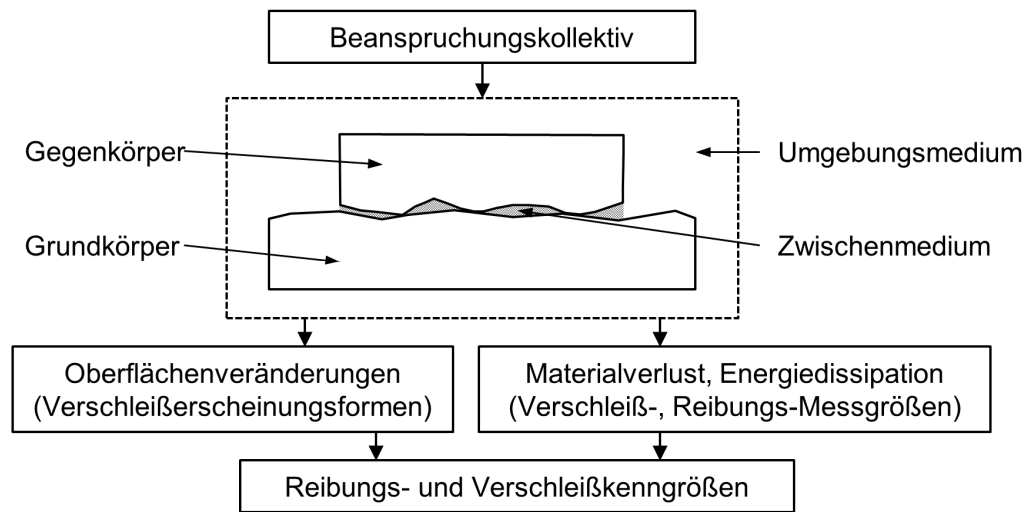


Abbildung 2: Komponenten und Vorgänge in einem Tribosystem nach [2]

Auf die Oberfläche eines Grundkörpers wirkt ein Gegenkörper ein. Zwischen diesen Körpern kann sich zusätzlich ein Zwischenstoff befinden. Das Umgebungsmedium schließt das System nach außen ab. Wirkt nun ein Beanspruchungskollektiv auf das System ein, interagieren die Komponenten miteinander. Die Oberflächen von Grund- und Gegenkörper können durch Materialverlust und Energiedissipation verändert werden (Verschleiß) gleichzeitig treten Energieverluste auf (Reibung). Diese beiden Begriffe sollen nun genauer definiert werden.

Reibung

„Reibung ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen. Bei äußerer Reibung sind die sich berührenden Stoffbereiche verschiedenen Körpern, bei innerer Reibung ein und demselben Körper zugehörig.“

Je nach Bewegungszustand kann man zwischen Haftreibung (keine Relativbewegung zwischen den Reibpartnern) und Bewegungsreibung (Relativbewegung zwischen den Reibpartnern) unterscheiden. Eine weitere Unterscheidung ist durch die Betrachtung des Aggregatzustandes der beteiligten Stoffbereiche möglich (Abbildung 3):





Festkörperreibung 	Ohne Schmierung
Grenzschichtreibung 	Schutzschicht durch Oxidation, Adsorption oder chemische Reaktion
Mischreibung 	Teilweiser Festkörperkontakt, Übergang in die Flüssigkeitsreibung
Flüssigkeitsreibung 	Vollständig trennender Flüssigkeitsfilm, (Elasto-) Hydrodynamik

Abbildung 3: Reibungszustände nach [3]

Die *Festkörperreibung* tritt bei unmittelbarem Kontakt zwischen Stoffbereichen mit Festkörpereigenschaften auf. Charakteristisch ist das völlige Fehlen eines Schmiermittels. In der Praxis wird oft nicht zwischen der Festkörperreibung und der

Grenzschichtreibung unterschieden. Sie bezeichnet den Kontakt zwischen auf dem eigentlichen Material befindlichen Grenzschichten. Diese Schutzschichten können bereits aus einer Oxidschicht bestehen, oder von anderweitigen chemischen oder mechanischen Reaktionen an der Bauteiloberfläche herrühren.

Die *Mischreibung* bezeichnet grundsätzlich jede Mischform von Reibungszuständen – meist ist jedoch der Übergang von Festkörper- oder Grenzschichtreibung zu Flüssigkeitsreibung gemeint. Die Bauteiloberflächen werden hier bereits teilweise durch einen Flüssigkeitsfilm getrennt, wodurch der Festkörperkontakt abnimmt.

Die *Flüssigkeitsreibung* tritt schließlich zwischen Körpern auf, die durch eine Flüssigkeit vollständig voneinander getrennt sind. Reibkräfte treten durch innere Scherung der Flüssigkeit auf.

Mitunter findet sich in der Literatur noch die Reibungsform der *Gasreibung*. Hier trennt eine Gasschicht die beiden Körper vollständig voneinander.

Kenngößen

Die wichtigsten Kenngößen zur Beschreibung eines reibungsbehafteten Systems werden im Coulomb'schen Reibungsgesetz zusammengefasst. Abbildung 4 zeigt das Kräftegleichgewicht bei der Ausübung einer Zugkraft F auf einen Körper, der reibungsbehaftet auf einer Oberfläche lagert. Zwischen Körper und Oberfläche wirkt die Normalkraft F_N .

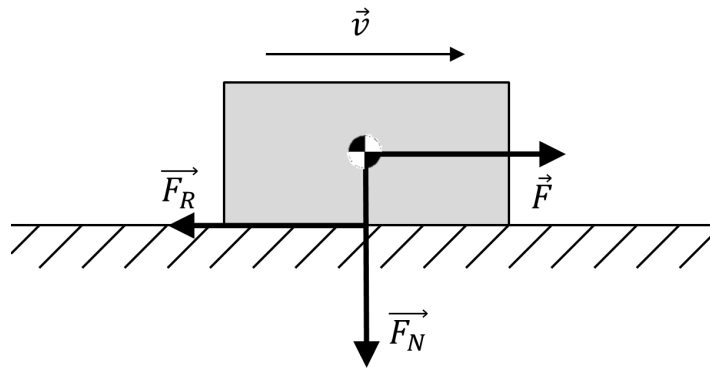


Abbildung 4: Kräftegleichgewicht bei der Coulomb'schen Reibung

Die Auftretenden Kräfte werden durch das das Coulomb'schen Reibungsgesetz zueinander in Beziehung gesetzt. Es lautet:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (1)$$

Mit F_R : *Reibkraft*, wirkt der Relativbewegung entgegen, in N

F_N : *Normalkraft*, senkrecht auf den Reibkontakt, in N

μ : *Reibkoeffizient (Reibungszahl f)*, definiert als Quotient aus Reibungskraft und Normalkraft

Der Reibkoeffizient bezieht die Reibkraft auf die Normalkraft und ist somit eine dimensionslose Kenngröße für die Reibeigenschaften eines Kontaktes.

Reibungsbehaftete Systeme bei denen eine Relativbewegung auftritt, unterliegen Verschleiß. Dieser wird im Folgenden genauer definiert.

Verschleiß

„Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, das heißt, Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet. Unter tribologischer Beanspruchung ist dabei die Gesamtheit der auf die Elemente des Verschleißsystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen zu verstehen. In der Technik ist Verschleiß normalerweise unerwünscht, das heißt wertmindernd. In Ausnahmefällen, wie zum Beispiel bei Einlaufvorgängen, können Verschleißvorgänge jedoch auch technisch erwünscht sein. Bearbeitungsvorgänge als wertbildende technologische Vorgänge gelten in Bezug auf das herzustellende Werkstück nicht als Verschleiß, obwohl im Kontaktbereich zwischen Werkstück und Werkzeug tribologische Prozesse wie beim Verschleiß ablaufen.“

Verschleißmechanismen

Die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse werden Verschleißmechanismen zugeordnet, siehe Abbildung 5.

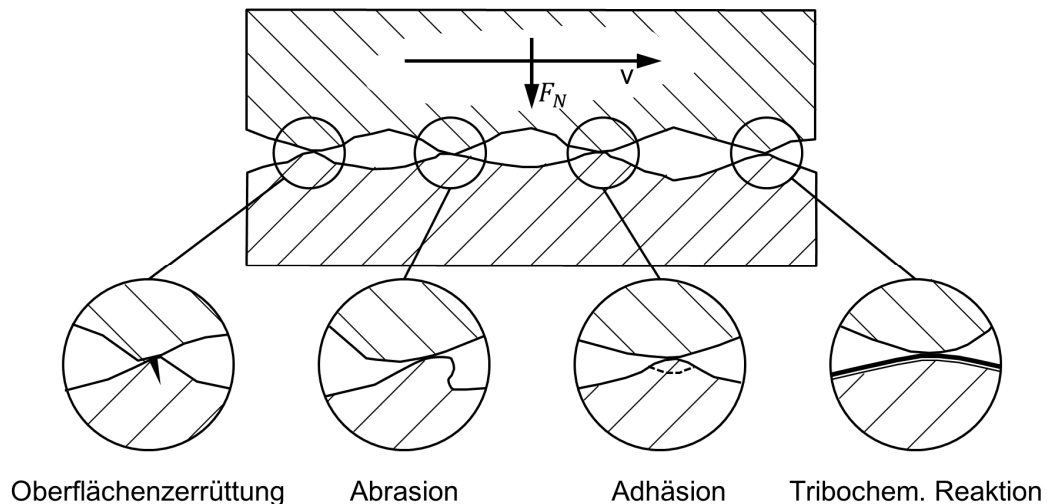


Abbildung 5: Mögliche Verschleißmechanismen nach [3]

Die *Oberflächenzerrüttung* entsteht durch tribologische Wechselbeanspruchung, die zu Materialtrennung, Materialabtragungen und Rissbildung führt. Hierdurch wird die Festigkeit herabgesetzt (Ermüdung).

Bei der *Abrasion* findet ein Materialabtrag durch furchende bzw. ritzende Beanspruchung statt (Mikrospanen, Mikrofurchen, Mikrobrechen).

Durch *Adhäsion* kommt es an den Grenzflächen zu Haftverbindungen (Kaltverschweißen), die als „Fressen“ bezeichnet werden. Werden diese Verbindungen gewaltsam getrennt, findet ein Materialübertrag statt. Die ursprüngliche Geometrie wird zerstört.

Bei *tribochemischen Reaktionen* reagieren Grundkörper, Gegenkörper und angrenzende Medien miteinander. Die tribologische Beanspruchung der Oberflächen fördert bzw. aktiviert hierbei chemische Reaktionen.

Schmierstoffe können durch die Trennung der Bauteiloberflächen zur Minderung des Verschleißes beitragen. Hierbei ist eine möglichst vollständige Trennung der Bauteiloberflächen erstrebenswert. Diese kann durch den Aufbau eines tragfähigen Ölfilms erreicht werden, dessen Beschreibung im folgenden Abschnitt erfolgt.

2.1.3 Hydrodynamische Schmierung

Zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß werden Schmierstoffe eingesetzt, die die Reibpartner voneinander trennen können. Die tribologischen Eigenschaften dieser Schmierstoffe werden maßgeblich durch deren innere Reibung bestimmt. Diese wird

durch die Viskosität (Zähigkeit) beschrieben. Modellhaft kann man sich die Viskosität als Widerstand vorstellen, den ein Fluid dem Verschieben seiner Teilenschichten entgegensetzt.

Es wird zwischen der dynamischen Viskosität η und der kinematischen Viskosität ν unterschieden. Beide sind über die Dichte ρ miteinander verknüpft:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (2)$$

Mit η : *dynamische Viskosität*, in $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ν : *kinematische Viskosität*, in m^2/s
 ρ : *Dichte*, in kg/m^3

Bei Relativbewegung im Schmierpalt wird der Ölfilm geschert. Der Geschwindigkeitsgradient im Schmierpalt bezogen auf die Schmierpalthöhe wird durch das sogenannte Schergefälle beschrieben:

$$\dot{\gamma} = \frac{\delta v}{\delta h} \quad (3)$$

Mit $\dot{\gamma}$: *Schergefälle*, in s^{-1}
 δv : *Geschwindigkeitsgradient*, in m/s
 δh : *Schmierpalthöhe*, in m

Verhält sich die Scherspannung τ proportional zur Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$, so spricht man von einem Newton'schen Fluid:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

Mit τ : *Scherspannung*, in N/m^2
 $\dot{\gamma}$: *Schergeschwindigkeit*, in s^{-1}

Die Theorie der hydrodynamischen Schmierung erklärt den hydrodynamischen Druckaufbau im Schmierpalt und wurde von Reynolds unter Annahme folgender Vereinfachungen aus der Navier-Stokes-Gleichung entwickelt [4]:

- Die Strömung im Spalt ist laminar
- Schwerkraft und Trägheitskräfte sind klein im Vergleich zur Scherkraft im Film
- Das Medium im Spalt ist inkompressibel
- Das Medium im Spalt verhält sich wie ein Newton'sches Fluid
- Der Druck im Schmierfilm ist konstant über die Schmierfilmhöhe
- Geschwindigkeitsänderungen finden nur entlang der Schmierfilmhöhe statt
- Das Fluid haftet ohne Schlupf an den Oberflächen

In Abbildung 6 wird das für die Berechnung zugrunde gelegte Koordinatensystem und die Spannungen am infinitesimalen Volumenelement definiert.

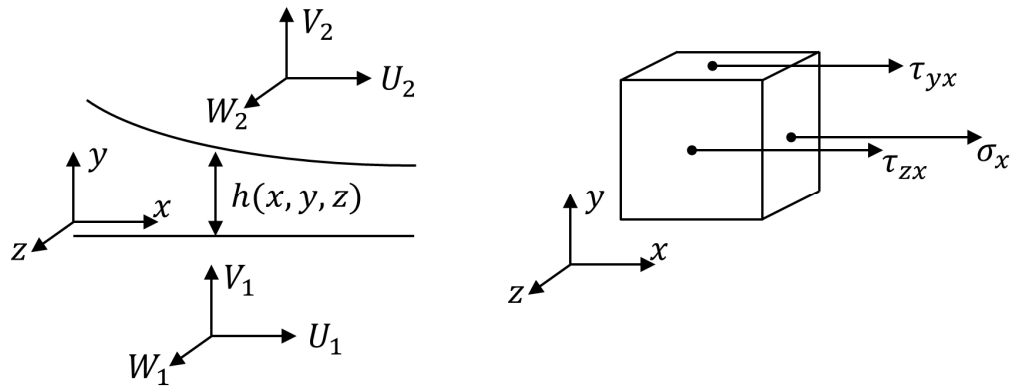


Abbildung 6: Definition des Koordinatensystems

Reynolds stellt das Kräftegleichgewicht am infinitesimalen Volumenelement auf und ersetzt dabei die Spannung in x-Richtung durch den Druck p im Schmier-spalt. Die Schubspannungen in y- und z-Richtung werden gemäß der Annahme eines Newton'schen Fluids über das Schergefälle definiert. Über die Randbedingung, dass das Fluid ohne Schlupf an den Oberflächen haftet, gelangt man an die Geschwindigkeitsverteilung im Spalt. Über die Kontinuitätsgleichung des Fluidflusses im Schmier-spalt erhält man weitere Randbedingungen und gelangt für $U_2 = 0$ und $U_1 = u$ zu folgender Form der Reynolds-Gleichung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \cdot \eta \cdot u \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + 6 \cdot \eta \cdot h \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + 12 \cdot \eta \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Druckverteilung im Schmier-spalt, deren grundsätzliche Form in Abbildung 7 a) zu sehen ist.

Die rechte Seite der Gleichung beschreibt die Ursachen für den hydrodynamischen Druckaufbau, die in drei Mechanismen unterteilt werden können, siehe Abbildung 7 b).

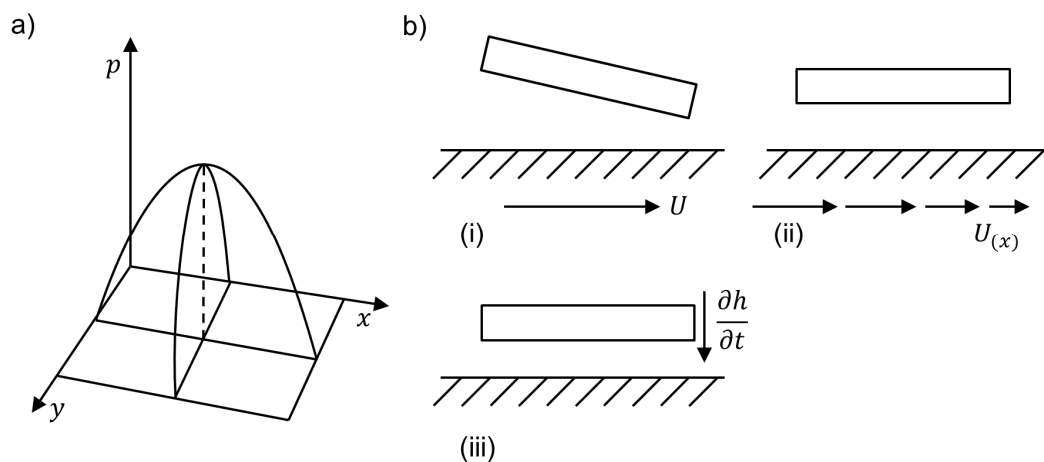


Abbildung 7: Die hydrodynamische Druckverteilung im Schmier-spalt und deren Ursachen:
a) Druckverteilung im Schmier-spalt, b) Mechanismen des Druckaufbaus

- i. Der erste Term beschreibt den Keil-Effekt (wedge effect). Der Druckaufbau erfolgt hier durch die Verengung des Schmierpaltes. Dieser Effekt überwiegt in technischen Reibkontakten.
- ii. Der zweite Term steht für den Dehnungs-Effekt (stretch effect). Hier sorgt eine Variation der Oberflächengeschwindigkeit für einen Druckaufbau im Spalt. Da der Dehnungs-Effekt vorrangig bei wenig steifen Materialien wie zum Beispiel Gummi vorkommt, kann er für metallische Werkstoffe meist vernachlässigt werden.
- iii. Der dritte Term wird als Quetsch-Effekt (squeeze effect) bezeichnet. Die zeitliche Variation der Schmierfilmdicke sorgt für einen Druckaufbau im Spalt. Ein typischer Reibkontakt, in dem der Quetsch-Effekt eine wichtige Rolle spielt, ist die Kolbenbolzenlagerung. Hier verändert die Pleuelkraft ständig die Schmierpalthöhe.

Obwohl die von Reynolds getroffenen Vereinfachungen die tatsächlichen Vorgänge im Schmierpalt nicht vollständig widerspiegeln, werden die grundsätzlichen Einflussfaktoren dennoch deutlich. Den Effekt des hydrodynamischen Druckaufbaus auf den Reibkoeffizienten beschreibt die sogenannte Stribeckkurve, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

2.1.4 Die Stribeckkurve

Werden zwei Körper aus dem Stillstand relativ zueinander bewegt, werden bedingt durch den geschwindigkeitsabhängigen hydrodynamischen Druckaufbau alle Reibungszustände durchlaufen. Trägt man den Reibkoeffizienten μ über der Relativgeschwindigkeit v auf, erhält man die sogenannte Stribeckkurve (Abbildung 8).

Die Gesamtreibung setzt sich aus den Anteilen der Festkörperreibung sowie der Flüssigkeitsreibung zusammen. Hierbei wird eine konstante Viskosität des Schmierfilms angenommen. Ohne Relativgeschwindigkeit wirkt die Haftreibung, die bei geringen Gleitgeschwindigkeiten in die Grenzschichtreibung übergeht. Daran schließt sich der Bereich der Mischreibung an. In diesem sorgt der hydrodynamische Schmierfilmaufbau für eine stetige Trennung der Bauteiloberflächen. Die Reibungszahl nimmt ab, um dann schließlich im sogenannten Ausklinkpunkt, der den vollständigen Wegfall der Festkörperreibung markiert, ihr Minimum zu erreichen. Bei Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit im Bereich der Flüssigkeitsreibung steigt der Reibungskoeffizient, trotz vollständig getrennter Bauteiloberflächen, aufgrund der steigenden Scherkräfte, weiter an.

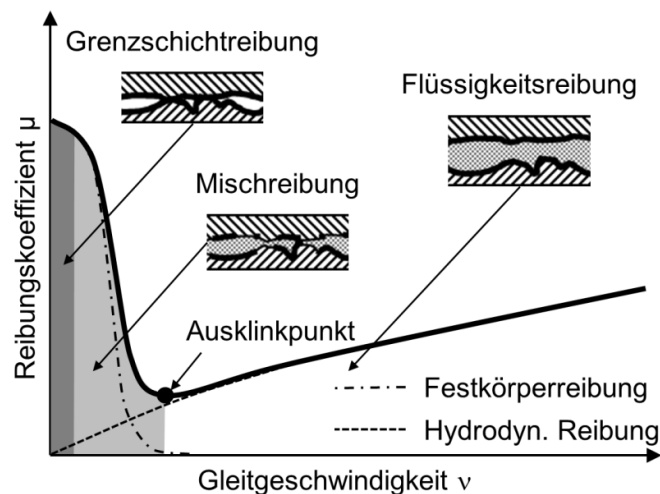


Abbildung 8: Die Stribeckkurve nach [3, 5, 6]

Die in der Stribeckkurve beschriebenen Reibungszustände werden im Motor in jedem Hub des Kolbens durch die auftretende periodische Geschwindigkeitsvariation durchlaufen.

Stellung der Kurbelwelle und dem jeweiligen Gasdruck im Brennraum. Die Seite, an der während des Expansionstaktes die größte Seitenkraft auftritt, wird als *Druckseite* bezeichnet. Die gegenüberliegende Seite entsprechend als *Gegendruckseite*.

Die Nomenklatur der wichtigsten Komponenten in der der Kolbengruppe ist in Abbildung 10 erläutert:

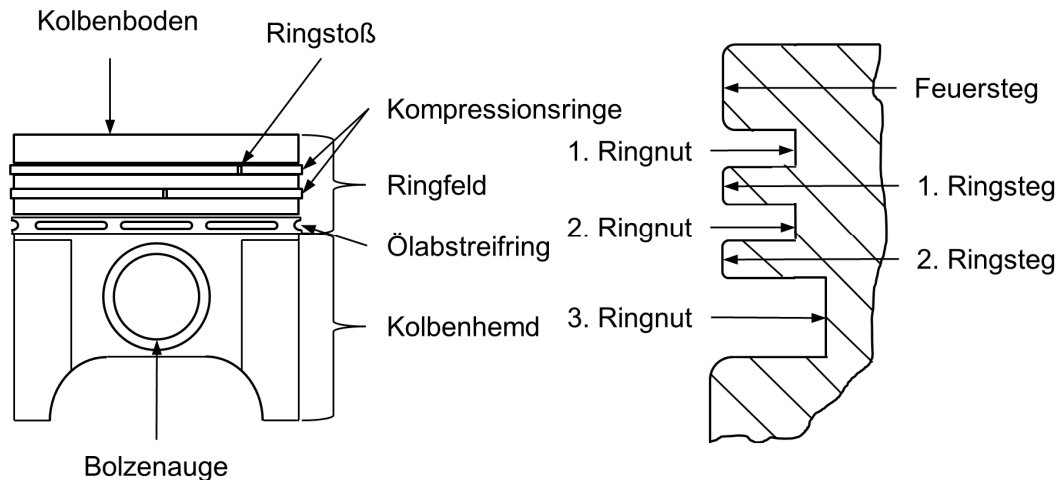


Abbildung 10: Terminologie der Kolbengruppe: Links: Übersicht des gesamten Pleuellagers. Rechts: Detailansicht des Ringfeldes.

Die obere Fläche des Pleuellagers, die den Brennraum beweglich abschließt, wird als Pleuellagerboden bezeichnet. Die Flanke des Pleuellagerbodens wird Feuersteg genannt und bildet den oberen Teil des Dichtsystems, das als Ringfeld oder Ringpartie bezeichnet wird. In diesem befinden sich die Pleuellagerpleuellager, die in den Ringnuten gehalten werden. Der Bereich zwischen den Ringnuten wird als Ringsteg bezeichnet. Unter dem Ringfeld befindet sich das Pleuellagerhemd (auch Pleuellagerenschaft genannt), das ein seitliches Verkippen des Pleuellagers verhindert und den Pleuellager während seiner Hubbewegung seitlich führt. Die über die Fläche des Pleuellagers gewandelte Gaskraft wird über den Pleuellagerpleuellager, der in den Pleuellagerpleuellagern gehalten wird, in die Pleuellagerpleuellagerkraft überführt.

Kolben

Der Pleuellager bildet zusammen mit den Pleuellagerpleuellagern den Gegenkörper des tribologischen Systems der Pleuellagerpleuellager, bezogen auf die Zylinderlaufbahn. Er hat die Grundstruktur eines einseitig geschlossenen Pleuellagers, der über den Pleuellagerpleuellager mit dem Pleuellager verbunden ist.

Die Hauptaufgaben des Pleuellagers sind die Volumenänderung des Brennraums und die Wandlung der Gaskraft in die Pleuellagerpleuellagerkraft. Darüber hinaus trägt er die Pleuellagerpleuellager und führt zusammen mit diesen einen Teil der Verbrennungswärme an die Zylinder-

derwand ab. Über die Gestaltung des Kolbenbodens können die Zylinderströmung, Gemischbildung und Verbrennung beeinflusst werden.

Während des Betriebs muss der Kolben Drücken von bis zu ca. 120 bar (Ottomotor) bzw. ca. 240 bar (Dieselmotor) bei maximalen Temperaturen von bis zu 400 °C (Aluminiumkolben) bzw. 500 °C (Stahlkolben) standhalten [8]. Zusätzlich wirken hohe Massenkräfte.

Bedingt durch die Hubbewegung mit den zwei Totpunkten ist die Kolbengeschwindigkeit über den Hub nicht konstant. Abbildung 11 zeigt den Kolbenweg und dessen zeitliche Ableitungen Kolbengeschwindigkeit und Kolbenbeschleunigung am Beispiel eines Daimler Ottomotors der Baureihe M270/M274 bei einer Drehzahl von 5000 1/min.

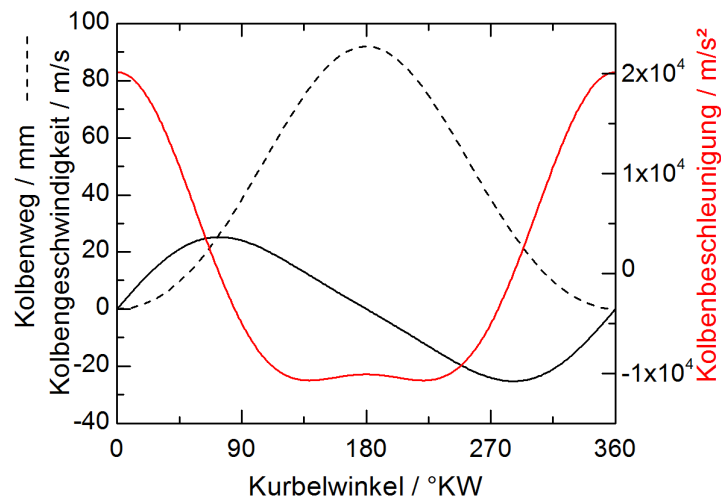


Abbildung 11: Kolbenkinematik des M270/274 bei einer Drehzahl von 5000 1/min.

Der Kolbenweg von 92 mm, der beginnend am oberen Totpunkt gemessen wird, verläuft aufgrund der Kopplung von Kurbelwelle und Kolben mittels Pleuelstange nicht exakt sinusförmig über den Kurbelwinkel. Dies hat zur Folge, dass die maximale Kolbengeschwindigkeit von etwa 25 m/s nicht bei Kurbelwinkeln von 90° bzw. 270° auftritt, sondern etwas in Richtung des oberen Totpunkt verschoben ist. Die Kolbenbeschleunigung ist aus demselben Grund am oberen Totpunkt etwa doppelt so hoch wie am unteren Totpunkt. Der maximale Wert der Kolbenbeschleunigung ist mit 20000 m/s² erheblich und bildet so bei hohen Drehzahlen einen großen Einflussfaktor auf das Verhalten der Kolbengruppe.

Um die oszillierenden Massen gering zu halten, werden Kolben in automobilen Anwendungen vorrangig aus Aluminiumlegierungen gefertigt. Die durch das Downsizing gesteigerte spezifische Motorleistung, mit der damit verbundenen höheren Kolbenbelastung, hat auch zur Entwicklung von Stahlkolben geführt, die aktuell in einigen Dieselmotoren eingesetzt werden.

Über die Gestaltung der Kolbenflanke, vor allem im Bereich des Ringfelds, kann das Verhalten des Dichtsystems Kolbengruppe entscheidend beeinflusst werden. Das Einbauspiel der Kolbenringe in den Ringnuten, die Vorspannung der Ringe, das Volumen zwischen den Ringen und dem Ringsteg oder die Druckverhältnisse im Ringfeld seien hier exemplarisch genannte Einflussfaktoren [9, 10].

Kolbenringe

Die Kolbenringe haben im Zusammenspiel mit dem Kolben und der Zylinderlaufbahn entscheidenden Einfluss auf die Funktion der Kolbengruppe hinsichtlich Dichtungs- und Reibungsverhalten.

In heutigen PKW-Motoren werden zumeist drei Kolbenringe eingesetzt, die als 1. und 2. Kompressionsring sowie Ölabstreifring bezeichnet werden (siehe Abbildung 10). Die Dichtwirkung wird in erster Linie durch die Kompressionsringe erfüllt, während der Ölabstreifring den Ölhaushalt der Kolbengruppe bestimmt. Überschüssiges Öl, das zur Schmierung und Kühlung des Kolbens über konstruktive Maßnahmen (z.B. Ölspritzdüsen) in das Ringfeld gelangt, wird von ihm von der Zylinderwand abstreift und in das Kurbelgehäuse zurückbefördert.

Um die Abdichtungsfunktion über den gesamten Hub zu gewährleisten, werden die Kolbenringe mit einer Vorspannung versehen. Diese sorgt dafür, dass die Kolbenringe während des Betriebs an der Zylinderoberfläche anliegen. Zusätzlich wirkt die Massenkraft durch die Kolbenbeschleunigung auf die Kolbenringe ein (siehe Abbildung 11). Bedingt durch die Relativbewegung zwischen Kolbenring und Zylinderwand treten Reibungskräfte auf. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Zylinderdruck, der auf die Flanken des Kolbenrings einwirken kann. Dieser Effekt ist in Abbildung 12 dargestellt.

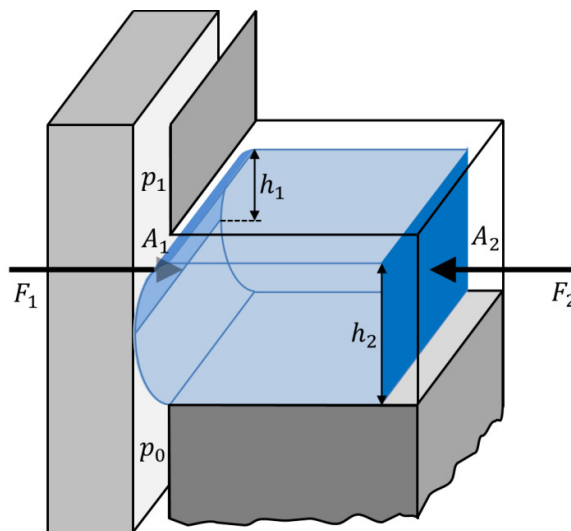


Abbildung 12: Radiale Druckkräfte am Kolbenring

Der durch das axiale Ringspiel hervorgerufene Spalt zwischen Kolbenring und Kolben ermöglicht den Druckausgleich zwischen Ringrückseite und Kolbenflanke. Die daraus resultierende Kraft im Kontakt zwischen Zylinderwand und Kolbenring $F_{Kontakt}$ ergibt sich aus der Kräftebilanz am Kolbenringsegment. Beim obersten Kolbenring entspricht der Druck p_1 oberhalb des Kolbenrings dem Druck im Brennraum. Dieser ist deutlich höher als der Druck p_0 unterhalb des Kolbenrings, der aus diesem Grund in der folgenden überschlägigen Rechnung vernachlässigt wird:

$$F_{Kontakt} = F_2 - F_1 = p_1 \cdot A_2 - p_1 \cdot A_1 \quad (6)$$

Wird von einer symmetrischen Balligkeit des Kolbenrings ausgegangen, so ist die Fläche A_1 halb so groß wie die gegenüberliegende Fläche A_2 ist. Dies führt zu folgender vereinfachten Gleichung:

$$F_{Kontakt} = F_2 - F_1 = p_1 \cdot A_2 - p_1 \cdot \frac{A_2}{2} = p_1 \cdot \frac{A_2}{2} \quad (7)$$

Über diese Gleichung lässt sich die Normalkraft pro Umfangslänge (z.B. als Betriebsparameter für die Versuche am Kolbenringtribometer) abschätzen: Bei Kolbenringen der Höhe $h_2 = 2 \text{ mm}$ ergibt sich eine druckbedingte Kontaktkraft von 1 N pro 10 mm Kolbenringbreite und pro 1 bar Brennraumdruck.

Die Form der Kolbenringe bestimmt somit auch deren Funktion, siehe Abbildung 13.

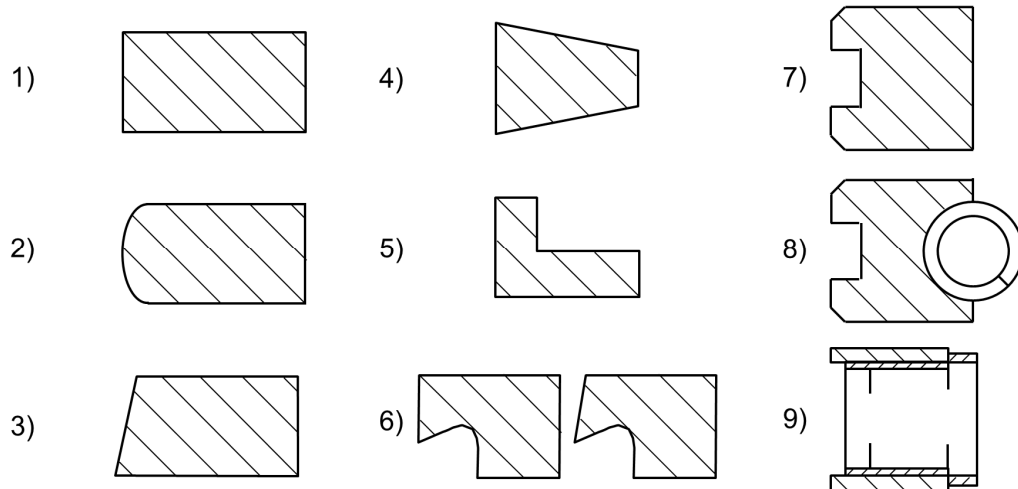


Abbildung 13: Kolbenringformen nach [11]

Die einfachste Bauform stellt der Rechteckring (1) dar. Die Lauffläche liegt hier über die gesamte Ringhöhe auf der Zylinderwand an. Bedingt durch das Einbauspiel des Kolbenrings in der Kolbenringnut, kippt dieser im Betrieb, was nach einiger Zeit zur Abrundung der Ecken führt (Einlauf). Hierdurch verbessert sich das Laufverhalten, da der Keil-Effekt für einen hydrodynamischen Druckaufbau im Ölfilm zwischen Zylinderwand und Kolbenringoberfläche sorgt. Moderne Kolbenringe nehmen diesen Einlauf durch eine ballig gestaltete Lauffläche vorweg, diese Bauform ist in (2) zu sehen. Eine

Abwandlung des Rechteckrings ist der Minutenring (3), der seinen Namen aufgrund der leicht angewinkelten Lauffläche (Steigung im Bereich von einigen Winkelminuten) trägt. Diese beschleunigt durch die geringe tragende Fläche den Einlauf. Zusätzlich wird eine einseitig gerichtete Ölabstreifwirkung erreicht. Sowohl beim balligen Ring als auch beim Minutenring kann der Brennraumdruck auf die zum Brennraum weisende Keiffläche wirken und somit die Anpresskraft auf die Zylinderwand reduzieren.

Bei Motoren, bei denen mit der Verkokung der Ringnut zu rechnen ist, was die Bewegung des Kolbenrings und damit seine Dichtfunktion einschränkt (Ringstecken), schafft der Doppeltrapezring (4) Abhilfe. Durch die angewinkelten Flanken arbeitet er sich bei Verschmutzung selbstständig frei.

L-förmige Ringe (5) werden vorrangig bei Zweitaktmotoren eingesetzt. Der senkrechte Schenkel dient als Wirkfläche für den Brennraumdruck, der den Ring auch bei Anlage an der oberen Ringnutkante an die Zylinderwand presst.

Nasenringe und Nasenminutenringe (6) kommen in der zweiten Ringnut zum Einsatz. Die nasenförmige Gestaltung der Lauffläche verbessert das Ölabstreifverhalten.

Die unterste Ringnut ist bei Viertaktmotoren den Ölabstreifringen vorbehalten (7 – 9). Zum besseren Abtransport des abgestreiften Öls sind die Ringe zwischen den Laufflächen meist mit Drainageöffnungen zur Ring-Rückseite versehen. Die einfachste Bauform ist der einteilige Ölabstreifring (7), die aber in modernen Motorkonstruktionen nicht mehr eingesetzt wird. Gesteigerte Anforderungen an die Funktionalität haben zur Entwicklung von mehrteiligen Ölabstreifringen geführt. Beim zweiteiligen Ring (8) sorgt eine Schlauchfeder für einen gleichmäßigen Anpressdruck an die Zylinderwand.

Dreiteilige Ölabstreifringe (9) bestehen aus zwei dünnen Stahlbandringen, die durch eine meist gewellte Blechfeder auf Abstand gehalten werden. Die Feder sorgt zusätzlich für eine Anpresskraft der Stahlbandringe an die Zylinderwand [11].

Zur Reduktion von Reibung und Verschleiß können die Laufflächeneigenschaften der Kolbenringe durch Beschichtungen verändert werden. Zum Beispiel durch [11]:

- Nitrieren
- Diamond-like Carbon (DLC)-Beschichtungen
- Flamspritzen (mit Molybdän-Anteilen)
- Verchromen (mit verschiedenen Zusätzen wie Keramik- oder Diamantpartikeln)
- Auftrag von Hartstoffschichten mittels Physical Vapor Deposition (PVD)

2.2.2 Die Zylinderwand

Die Zylinderwand bildet den Grundkörper des tribologischen Systems der Kolbengruppe und hat somit Einfluss auf deren Verhalten. Neben den eingesetzten Grundwerkstoffen soll in diesem Abschnitt vor allem auf die Oberflächenbeschaffenheit der Zylinderwand eingegangen werden.

Werkstoffe

In modernen Verbrennungsmotoren kommen verschiedene Zylindermaterialien zum Einsatz. Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss) stellt hier den klassischen Werkstoff dar. Er ist preiswert, stabil und leicht bearbeitbar. Besteht das Kurbelgehäuse aus Gusseisen, kann es direkt als Lauffläche dienen. Motoren aus Gusseisen werden aus Gewichtsgründen jedoch immer seltener eingesetzt und durch Kurbelgehäuse aus Aluminium ersetzt. Diese bieten zusätzlich zum Gewichtsvorteil noch eine deutlich bessere Wärmeleitung im Vergleich zum Gusseisen. Nachteilig sind die schlechten tribologischen Eigenschaften des Aluminium-Gusswerkstoffs [12]. Für die Gestaltung der Lauffläche bieten sich verschiedene Lösungen an, die in Abbildung 14 aufgeführt sind:

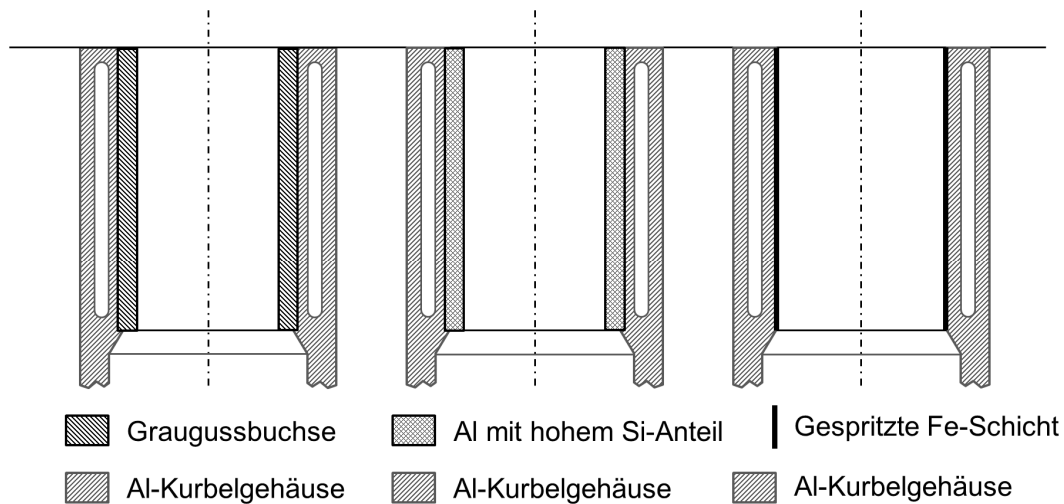


Abbildung 14: Ausführung der Zylinderwand in Aluminium-Kurbelgehäusen mittels Graugussbuchse, Al-Si Laufbahn sowie gespritzter Eisenschicht

Mit dem Einsatz von Grauguss-Buchsen in das Aluminium-Kurbelgehäuse erhält man eine Laufbahnoberfläche mit günstigen tribologischen Eigenschaften. Die relativ dicken Buchsen haben jedoch Gewichtsnachteile. Eine Alternative stellen Aluminium-basierte Laufbahnmaterialien dar. Durch den Einguss von Siliziumstrukturen entsteht im Bereich der Lauffläche eine Aluminium-Silizium-Legierung, die im Gegensatz zu reinem Aluminium deutlich verbesserte tribologische Eigenschaften aufweist. Untersuchungen zeigen jedoch vor allem bei hohen Motorlasten, die bei Downsizing-Motoren (kleiner Hubraum, hohe Aufladegrade) vermehrt auftreten, eine unzureichende Festigkeit dieses Laufbahnmaterials [13].

Eine weitere Möglichkeit die Laufbahn im Zylinder zu schaffen stellen auf Aluminium gespritzte Eisenschichten dar. Als Beispiel wird das das Verfahren des Lichtbogen-drahtspritzend (LDS) genannt. Durch einen Lichtbogen wird das sich in Drahtform befindliche Laufbahnmaterial aufgeschmolzen und durch einen Gasstrom auf das zuvor aufgeraute Aluminiumkurbelgehäuse aufgespritzt. Das Verfahren erzeugt eine etwa

200 µm dicke Laufbahnschicht, die sich durch eine hohe Härte und einen hohen Porengehalt auszeichnet [14]. Das Verfahren ist in Abbildung 15 genauer beschrieben.

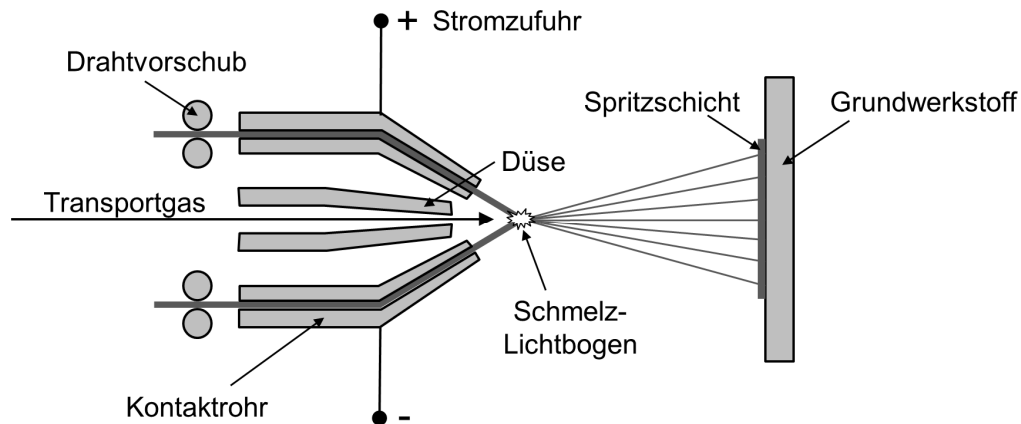


Abbildung 15: Entstehung einer gespritzten Zylinderlaufbahn nach [15]

Der Zylinderlaufbahnwerkstoff wird in Drahtform über Kontaktrohre, die die elektrische Kontaktierung des Drahtes erlauben, dem sogenannten Brenner zugeführt. Zwischen den zwei Werkstoffdrähten wird ein Lichtbogen gezündet, der Temperaturen von bis zu 6500°C erreicht und so den Draht aufschmilzt. Der nun flüssige Werkstoff wird durch ein Transportgas, das über eine Düse dem Schmelzbereich zugeführt wird, abtransportiert und auf den Grundwerkstoff aufgespritzt. Der Grundwerkstoff, in diesem Fall das Aluminium-Kurbelgehäuse, wird vor dem Spritzvorgang so behandelt, dass die Spritzschicht dauerhaft auf dem Grundwerkstoff haftet [16] .

Honungen

Das Honen zählt als Schleifprozess zu den spanenden Feinbearbeitungsverfahren. Durch Honen erreicht man die gezielte Aufrauhung der Zylinderlaufbahn-Oberfläche zur Verbesserung deren Ölhaltevermögens. Mit einem speziellen Werkzeug, der Honahle, wird die Zylinderwand mit einem kreuzförmigen Schliff versehen, der Riefen auf der Zylinderwand, das sogenannte Honbild, hinterlässt. Durch diesen Prozess können die tribologischen Eigenschaften der Zylinderlaufbahn gezielt beeinflusst werden, um Einlaufverhalten, Reibung, Verschleiß und Emissionswerte zu optimieren [17]. Abbildung 16 zeigt das Bild einer typischen Honstruktur. Die Riefen in der Zylinderoberfläche sind deutlich zu erkennen. Der Winkel zwischen den Riefen wird als Honwinkel bezeichnet.

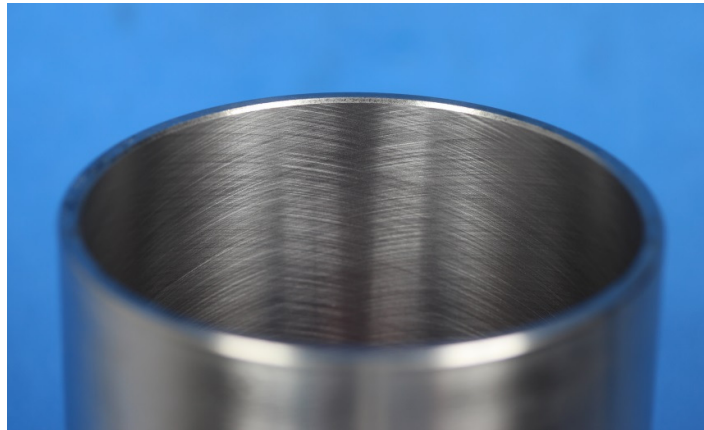


Abbildung 16: Honbild mit der typischen Kreuzriefenstruktur

2.2.3 Motorenöle

Das Zwischenmedium im tribologischen System der Kolbengruppe ist das Motoröl. Hier erfüllt es eine Reihe von Aufgaben, die im folgenden Abschnitt erläutert werden. Zusätzlich werden die wichtigsten Eigenschaften von Motorenölen in modernen Verbrennungsmotoren aufgezeigt.

Aufgabe

Die offensichtlichste Aufgabe eines Motorenöls ist sicherlich die Schmierung von beweglichen Bauteilen zur Reibungsreduktion und zum Verschleißschutz. Es ermöglicht den Aufbau einer schützenden Oberflächenschicht und eines hydrodynamischen Schmierfilms. Ein modernes Motorenöl übernimmt jedoch noch eine Reihe weiterer Aufgaben [18]:

Übertragung von Kräften zum Beispiel im Ventilspielausgleich oder im Nockenwellensteller

Wärmeabfuhr zum Beispiel von überschüssiger Wärme aus der Kolbengruppe (Spritzölkühlung des Kolbenbodens) oder bei luft-/ölgekühlten Motoren

Dichtfunktion durch Auffüllen von Zwischenräumen in der Kolbengruppe

Reinigung der Motorbauteile von Schmutz wie Verbrennungsrückständen, Ölkohle bzw. Ölschlamm

Korrosionsschutz der Motorbauteile

Die Eigenschaften des Motoröls werden über seine Zusammensetzung bestimmt.

Zusammensetzung von Motorenölen nach [18]

Die Zusammensetzung eines Motorenöls wird durch das Grundöl sowie das Additivpaket bestimmt. Bei den Grundölen unterscheidet man zwischen Mineralölen, synthetischen Ölen sowie Gemischen aus diesen beiden Gruppen, die als teilsynthetische Öle bezeichnet werden. Mineralöle werden durch Destillation aus Rohöl gewonnen und

stellen somit ein Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe dar. Im Anschluss an die Destillation können Mineralöle in einem Raffinierungsprozess weiter veredelt werden. Synthetische Öle werden durch verschiedene Verfahren aus chemischen Reinstoffen (z.B. Ethen) synthetisiert. Iso-Paraffine, Polyalphaolefine und organische Ester stellen hierbei die Hauptgruppen der Produkte dar.

Um die Funktionsfähigkeit eines modernen Verbrennungsmotors auch langfristig zu gewährleisten bzw. überhaupt zu ermöglichen, sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Grundöle nicht ausreichend. Diese werden durch Zusätze, sogenannte Additive, erreicht, die dem Grundöl in Dosierungen bis über 20% zugegeben werden. Die wichtigsten Additive und ihre Funktion im Verbrennungsmotor werden im Folgenden tabellarisch dargestellt.

Tabelle 1: Motoröladditive und ihre Funktion nach [18]

Additivtyp	Funktion	Beispiel
Detergenzien	Neutralisation von Säuren, Verhinderung von Lackbildung	Kalzium-/Magnesium-Sulfonate, -phenolate, -salicylate
Dispergentien	Dispergieren von Fremdstoffen, Verhinderung von Ablagerungen	Polyisobuten-Succinimide
Korrosionsinhibitoren	Verhinderung von Korrosion	Kalzium- oder Natrium-Sulfonate, organische Amine
Metalldeaktivatoren	Oxidationsverhinderung durch Schutzfilmbildung auf Metall	organische Schwefel- und Stickstoffverbindungen
Oxidationsinhibitoren	Verhinderung von Öloxidation	Zinkdithiophosphate, Phenole, Amine, Metallsalicylate
Fließverbesserer	Verbesserung der Fließfähigkeit bei Niedrigtemperatur	polymere Methacrylate
Reibverminderer	Minimierung von Reibungsverlusten	Fettsäuren und Fettsäure-Derivate, organische Amine
Schaumverhinderer	Verhinderung von Schaumbildung	Silikonverbindungen
Verschleißverhinderer	Verschleißreduktion	Zinkdithiophosphate, organische Phosphate, organische Schwefelverbindungen
Viskositätsindexverbesserer	Verbesserung der Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur	Polymethacrylate, Polyisobutylene, Co-Polymere

Viskosität und Dichte

Für die tribologischen Eigenschaften des Motoröls spielen die Viskosität und die Dichte des Schmiermittels eine große Rolle (siehe Abschnitt 2.1.3).

Die Viskosität des Grundöls zeigt ein ausgeprägtes Temperaturverhalten. So nimmt die Viskosität mit der Temperatur annähernd hyperbolisch ab, die Dichte hingegen nimmt mit steigender Temperatur linear ab, siehe Abbildung 17.

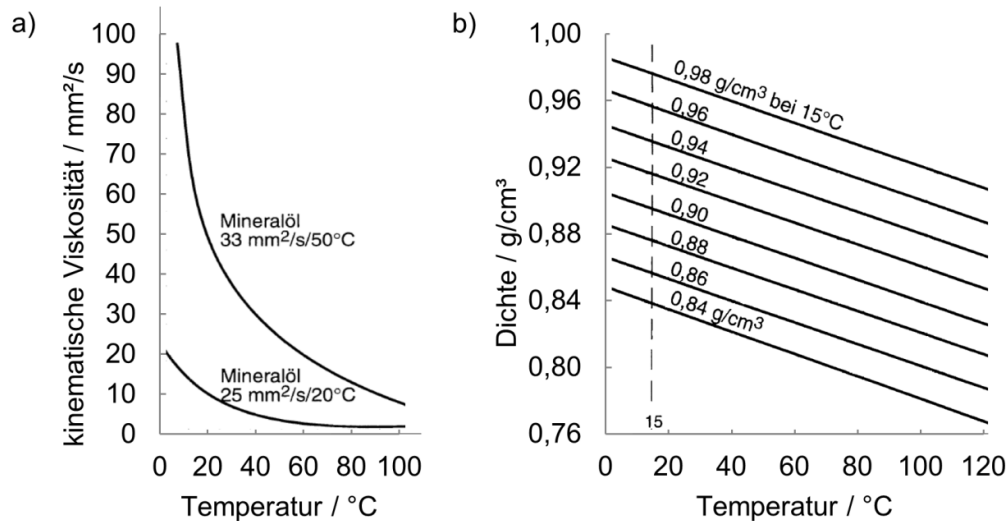


Abbildung 17: a) Temperaturabhängigkeit der Öl-Viskosität, b) Temperaturabhängigkeit der Dichte von Mineralöl [19, 20]

Im Motorbetrieb variiert die Öltemperatur und somit die Viskosität des Öls zum Teil erheblich. Beim Kaltstart hat das Öl Umgebungstemperatur, in manchen Volllastpunkten kann das Öl Temperaturen von bis zu 150°C erreichen. Eine Änderung der Viskosität während des Motorbetriebs um mehrere Zehnerpotenzen ist somit durchaus üblich, während sich die Dichte nur um wenige Prozent verändert. Das viskose Öl verursacht beim Kaltstart große Reibungsverluste in den Lagern bzw. durch die herabgesetzte Pumpfähigkeit, weshalb man die Ölerwärmung häufig durch konstruktive Maßnahmen beschleunigt. Zu hohe Öltemperaturen und eine damit verbundene zu geringe Viskosität gilt es ebenso zu vermeiden.

HTHS-Wert [18]

Motorenöle weisen bei hohen Scherraten eine Abweichung vom ideal Newton'schen Verhalten auf. Die Viskosität nimmt bei hohen Schergefällen ab. Der sogenannte HTHS-Wert (high temperature, high shear) gibt die Viskosität eines Schmiermittels bei einer Temperatur von 150°C und einem Schergefälle von 10^6 s^{-1} in der Einheit mPas an. Übliche Motorenöle weisen HTHS-Werte von $2 - 4 \text{ mPas}$ auf.

Eigenschaften der verwendeten Versuchsöle

Für die optischen Untersuchungen kommen zwei verschiedene Motoröle zum Einsatz, die sich in ihrer Viskosität unterscheiden, jedoch mit dem gleichen Additivpaket ausgestattet sind. Dies ermöglicht es, den Einfluss der Viskosität auf das Ölfilmverhalten zu untersuchen. Die Unterscheidung der Öle erfolgt anhand ihrer HTHS-Viskosität. Versuchsöl A weist einen HTHS-Wert von 2,9 mPas auf und liegt damit im üblichen Bereich moderner Motorenöle. Bei Versuchsöl B handelt es sich um ein reines Forschungsöl mit einem HTHS-Wert von 1,4 mPas. Die Daten der Ölanalysen stammen vom Ölhersteller und sind im Folgenden dargestellt. Abbildung 18 zeigt die Abnahme der Viskosität bei Erwärmung der jeweiligen Versuchsöle A und B.

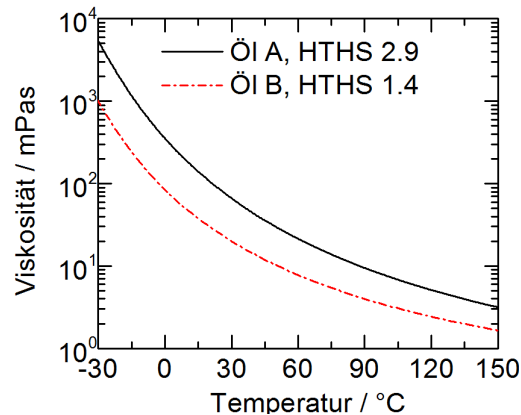


Abbildung 18: Temperaturabhängigkeit der Viskosität der Versuchsöle A und B

Die Viskosität beider Versuchsöle variiert im Temperaturbereich zwischen -30 und 150°C um nahezu drei Zehnerpotenzen. Versuchsöl A weist erwartungsgemäß über den gesamten untersuchten Temperaturbereich eine höhere Viskosität als Versuchsöls B auf. Die scherratenabhängige Viskosität der beiden Versuchsöle bei 80, 110 sowie bei 150°C ist in Abbildung 19 und in Abbildung 20 dargestellt.

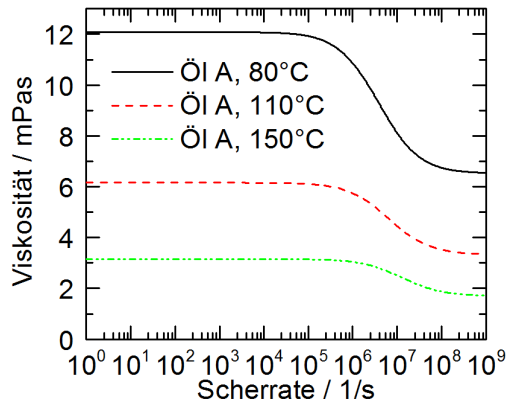


Abbildung 19: Scherratenabhängige Viskosität von Versuchsöl A

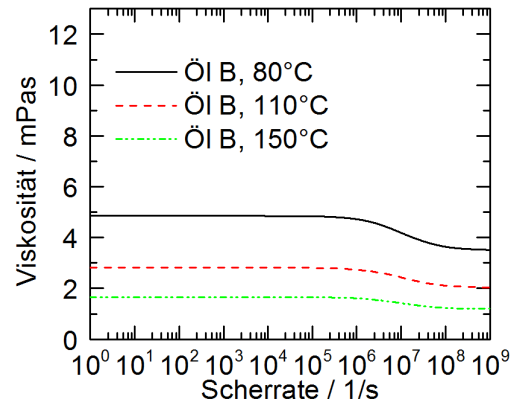


Abbildung 20: Scherratenabhängige Viskosität von Versuchsöl B

Bis zu einer Scherrate von 10^5 s^{-1} bleibt die Viskosität bei der jeweiligen Temperatur nahezu konstant. Im Bereich zwischen 10^5 s^{-1} und 10^8 s^{-1} sinkt die Viskosität deutlich ab, wobei sich der kontinuierliche Abfall bei höheren Öltemperaturen über einen weiteren Bereich erstreckt. Bei Öl A fällt der prozentuale Abfall der Viskosität zudem deutlicher höher aus, als bei Öl B.

2.3 Phänomene in der Kolbengruppe

Die Kolbengruppe ist ein reibungsbehaftetes Dichtsystem in Relativbewegung. Neben den Lagerstellen von Nocken- und Kurbelwelle ist sie für einen Großteil der innermotorischen Reibung verantwortlich, die es zu verringern gilt. Dabei muss jedoch eine ausreichende Dichtwirkung gewährleistet werden. Dies beschreibt den Zielkonflikt bei der Weiterentwicklung der Kolbengruppe.

Während des Motorbetriebs wirken Gas-, Reibungs- und Massenkräfte auf das Dichtsystem der Kolbengruppe ein. Bedingt durch unvermeidbare Leckage interagieren die drei Fluide Kraftstoff, Motoröl und Leckage-Gas (Blowby) miteinander.

Dies führt zu einer Reihe von unerwünschten Phänomenen, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Abbildung 21 gibt einen Überblick über die in der Kolbengruppe auftretenden Phänomene.

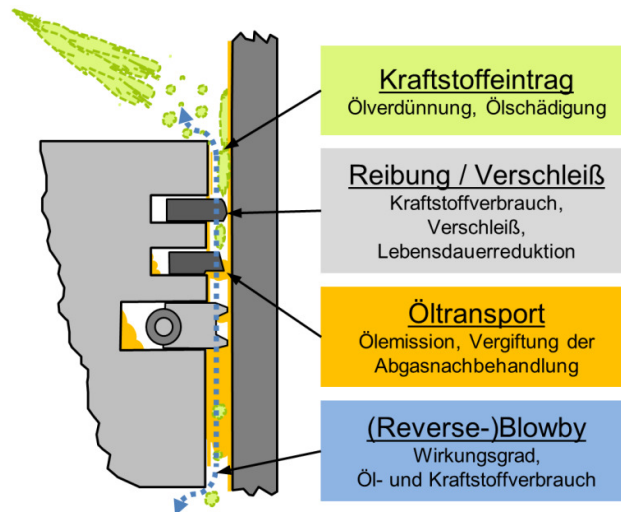


Abbildung 21: Phänomene in der Kolbengruppe

Kraftstoffeintrag ins Motoröl

Der Trend zu kleinvolumigen, aufgeladenen Motoren (downsizing) führt zu kleineren Zylinderbohrungen und höheren Mitteldrücken. Bei gleichzeitig steigender Einspritzmenge verkürzt sich so die Flugzeit des verdampfenden Kraftstoffs, der in Folge dessen vermehrt die Zylinderwand benetzen kann. Der Wechsel von der klassischen Saugrohreinspritzung zur Direkteinspritzung beim Ottomotor verschärft diese Problematik zusätzlich. Dieselmotoren, die zur Erhöhung der Abgasenthalpie für die Regeneration der Partikelfilter den Einspritzbeginn nach spät verstellen, sind ebenfalls von der Wandbenetzung und dem damit verbundenen Kraftstoffeintrag ins Motoröl betroffen.

Der auf die Zylinderwand aufgespritzte Kraftstoff wird im Verlauf des Pleuellhubes vom Ringfeld verschmiert und so, unterstützt vom Leakage-Gasstrom aus dem Brennraum, in Richtung Pleuellgehäuse transportiert [21, 22]. Hier führt er zur Verdünnung und Schädigung des Motoröls beispielsweise durch Inaktivierung der Verschleiß- und Korrosionsschutzadditive [23, 24]. Unverbrannter Kraftstoff, der im Brennraum zurückbleibt, trägt maßgeblich zur HC-Emission von Verbrennungsmotoren bei [25, 26].

Des Weiteren steht der Eintrag von Kraftstoff in den Pleuellstegbereich des Pleuels in Verdacht zur vorzeitigen Entflammung der Zylinderladung (Vorentflammung, low-speed pre-ignition LSPI) bei Ottomotoren beizutragen. Zahdeh et al. [27] untersuchen unter anderem den Einfluss des Kraftstoffeintrags auf die Vorentflammungsneigung eines aufgeladenen direkteinspritzenden Motors. Sie stellen fest, dass eine hohe Wandbenetzung zu erhöhter Vorentflammungsneigung führt. Amann et al. [28] sehen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen der Gemischbildung (Saugrohreinspritzung bzw. Direkteinspritzung) auf die Vorentflammungsneigung. Außerdem zeigen sie, dass die Gestaltung des Pleuellstegs einen Einfluss auf die Vorentflammungsneigung hat.

Öltransport

Die Kolbengruppe wird bei Viertaktmotoren, die in PKW und NFZ zum Einsatz kommen, durch Spritzöl aus dem Kurbelraum mit Schmierstoff versorgt. Dieses wird entweder von der Kurbelwelle abgeschleudert oder durch Ölspritzdüsen, die durch das Pleuellager oder aus dem Hauptölkanal versorgt werden können, gezielt in Richtung Kolben transportiert.

Im Bereich der Kolbengruppe ist das Schmieröl dann einer Reihe von Kräften ausgesetzt. Neben der Massenkraft üben die Kolbenringe mechanisch Kraft auf das Schmieröl aus. Je nach Arbeitstakt wirken durch die auftretenden Leckagegas-Strömungen zusätzlich aerodynamische Kräfte auf das Schmieröl. Dies führt in Summe zu Öltransportvorgängen, die erheblich zum Ölverbrauch des Verbrennungsmotors beitragen [29-31]. Die Folge sind neben erhöhten Abgasemissionen (unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Ruß) die Vergiftung der Abgasnachbehandlungssysteme mit Asche [32, 33]

Der Eintrag von Schmieröl in den Brennraum beeinflusst zudem die Verbrennung. Attard et al. [34] manipulieren die Kolbenringe an einem Versuchsmotor, um eine höhere Öleintrag in den Brennraum zu erzwingen und stellen daraufhin eine erhöhte Klopfneigung fest. Amann und Alger [35] untersuchen den Einfluss verschiedener Öle auf das Klopfverhalten eines Ottomotors und stellen je nach Ölsorte eine Verschiebung der Klopfgrenze fest. Zur Quantifizierung der Ölreaktivität verwenden sie die Zündverzugszeit des Motoröls, die sie mit der Cetanzahl korrelieren.

Takeuchi et al. [36] untersuchen verschiedene Grundöle sowie unterschiedliche Öladditive in Bezug auf deren Einfluss auf die Vorentflammungsneigung. Bei den Grundölen stellen sie eine Korrelation zwischen der Selbstzündungstemperatur und der Vorentflammungsneigung fest. Yasueda et al. [37] untersuchen den Zusammenhang von Öleintrag in den Brennraum und Vorentflammungen an einem Gasmotor. Sie weisen nach, dass die Selbstzündung von Schmieröl im Brennraum zu Vorentflammung des Luft-Gasgemisches führt und weisen einen starken Zusammenhang zwischen der Vorentflammungsneigung und der Verdichtungsendtemperatur nach.

Reibung und Verschleiß

Wie jedes tribologische System unterliegt auch die Kolbengruppe Reibung und Verschleiß.

Gemäß Untersuchungen von Beulshausen et al. [38] ist die Reibung der Kolbengruppe im FTP75-Testzyklus für die Dissipation von 23% der gesamten Reibenergie und 2,36% der insgesamt aufgewendeten Kraftstoffenergie verantwortlich. Schommers et al. [39] zeigen, dass in der niedrigen Teillast 9% der Kraftstoffenergie direkt als Reibleistung und 16% indirekt als Verbrennungsabwärme bei der Aufbringung der Reibleistung verloren gehen. Weiterhin wird der Kolbengruppe mit 48% der größte Reibungsverlust unter dem Reibstellen zugewiesen. Insofern ist die Optimierung des tribologi-

schen Systems der Kolbengruppe sehr wichtig für die Effizienzsteigerung des Verbrennungsmotors.

Wakuri et al. [40] untersuchen den Einfluss verschiedener Kolbenringformen und Ölviskositäten auf die Reibleistung. Dabei stellen sie fest, dass die Kolbenringe über einen Großteil des Kolbenhubes zu wenig Öl für eine vollständig hydrodynamische Schmierung zur Verfügung haben (Mangelschmierung). Das Verhalten der Kolbenringe unter diesen Bedingungen sei entscheidend für die Reibungsverluste in der Kolbengruppe. Die Analyse der Ölverteilung in der Kolbengruppe ist daher von großem Interesse und wird intensiv erforscht (siehe Kapitel 3).

Neue Laufbahntechnologien, wie thermisch gespritzte Eisenschichten, in Kombination mit neuen Honverfahren zeigen durch glattere Oberflächen und ein optimiertes Ölangebot zusätzliches Potential zur Senkung der Reibungsverluste in der Kolbengruppe.

Unter Gesichtspunkten der Ressourcenschonung, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit ist der Verschleiß zu bewerten. Über die Laufzeit des Motors darf der unvermeidbare Verschleiß die Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigen. Grundsätzlich unterliegt die Zylinderbuchse besonders im Bereich des oberen Totpunktes erhöhtem Verschleiß, da hier hohe Wandtemperaturen, geringe Schmierölmenge und geringe Gleitgeschwindigkeit zusammen auftreten. Dieses Phänomen wird unter dem Ausdruck „Zwickelverschleiß“ zusammengefasst und ist bei der Auslegung der Kolbenringkomponenten zu berücksichtigen [11]. Darüber hinaus können bestimmte Kraftstoffzusätze (vor allem Schwefelverbindungen) zu einem chemischen Verschleiß der Zylinderlaufbahn führen [7, 41].

Blowby

Leckage-Gas, das aus dem Brennraum in den Kurbelraum gelangt, wird als Blowby bezeichnet. Durch den Gasverlust sinkt der thermodynamische Wirkungsgrad des Motors [42]. Zusätzlich unterstützt das Leckage-Gas Transportvorgänge in der Kolbengruppe. Unverbrannter Kraftstoff und Verbrennungsrückstände wie Ruß werden durch die Strömung in Richtung Kurbelgehäuse transportiert. Der Kraftstoffanteil steht somit nicht mehr unmittelbar der Verbrennung zur Verfügung und das Motoröl wird verdünnt und geschädigt [23, 43]. Gas, das aus dem Kurbelgehäuse oder dem Ringfeld in den Brennraum gelangt, wird als Reverse-Blowby bezeichnet. Öl und Kraftstoff aus dem Ringfeld werden in Richtung Brennraum gefördert und interagieren hier mit der Gasphase. Sie stehen im Verdacht, extreme Verbrennungsvorgänge wie Klopfen oder Vor-entflammung auszulösen (siehe Abschnitt: Kraftstoffeintrag ins Motoröl, Öltransport). Öl, das mit der Gasphase ausgeschieden wird, erhöht die Emissionswerte und setzt in Form von Asche der Abgasnachbehandlung zu (siehe Abschnitt: Öltransport).

Die Leckagegasmenge ist somit durch eine geeignete Gestaltung des Dichtsystems Kolbengruppe zu minimieren. Im Gegensatz zur Ölverteilung in der Kolbengruppe stehen zur Berechnung der Blowbymenge geeignete Simulationsprogramme zur Verfügung [44, 45].

3 Filmdickenmessung an Tribometern und Motoren

In der Literatur findet sich eine Reihe von Verfahren zur Bestimmung der Dicke von Flüssigkeitsschichten. In Bezug auf tribologische Fragestellungen steht die räumliche Verteilung und die Dicke des Ölfilms im Fokus des Interesses. Es werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die sowohl an Motoren, als auch an Modelltests (Tribometern) umgesetzt wurden. Im Zusammenhang mit den Phänomenen der Kolbengruppe ist auch die Visualisierung der Kraftstoffverteilung von Interesse.

Optische Verfahren weisen hier im Vergleich zu gängigen elektrischen Messverfahren eine Reihe von prinzipiellen Vorteilen auf (siehe Abschnitt 3.2.1).

- Sie sind durch den möglichen Einsatz von flächig ausgedehnten optischen Zugängen zur zweidimensionalen Messung geeignet und nicht auf die punktförmige Vermessung der Schmierspaltgeometrie beschränkt.
- Durch die direkte Erfassung des im Spalt befindlichen Schmiermittels gehen Informationen über den Füllzustand des Spaltes oder der Verteilung des Schmiermittels über einen größeren Bereich im Gegensatz zu den elektrischen Spaltemessverfahren nicht verloren.
- Optische Verfahren arbeiten berührungslos und benötigen somit keine Kabel.

Diesen Vorteilen steht der Nachteil des optischen Zugangs gegenüber. Dieser erfordert fast immer eine Modifikation der Messanordnung.

Ein großer Teil der optischen Messverfahren basiert auf der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF). Zu Beginn des Abschnitts werden daher die Grundlagen der Schichtdickenmessung mittels laserinduzierter Fluoreszenz vorgestellt. Das Verfahren wird im Anschluss daran mit alternativen Methoden zur Filmdickenmessung verglichen.

3.1 Filmdickenmessung mit laserinduzierter Fluoreszenz

Dieser Abschnitt widmet sich den theoretischen Grundlagen der laserinduzierten Fluoreszenz und stellt im Anschluss den Stand der Technik vor.

3.1.1 Physikalische Grundlagen der Fluoreszenz

Weimar [46] stellt in seiner Arbeit die physikalischen Grundlagen der laserinduzierten Fluoreszenz sehr übersichtlich dar. Der Inhalt des folgenden Abschnitts lehnt an seine Ausführungen an.

Licht und seine Eigenschaften

Licht stellt nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums dar. Ihm werden sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften zugewiesen. Nach Huygens Wellen-

theorie [47] breitet sich Licht mit der Lichtgeschwindigkeit c von der Quelle aus. Diese lässt sich als Produkt der Wellenlänge λ und der Frequenz ν beschreiben:

$$c = \lambda \nu \quad (8)$$

Mit c : *Lichtgeschwindigkeit*, in m/s

λ : *Wellenlänge*, in m

ν : *Frequenz*, in s^{-1}

Planck [48] konnte die Teilcheneigenschaften des Lichts mit seiner Quantentheorie begründen. Demnach sendet eine Strahlungsquelle sogenannte Quanten aus - kleine Energieportionen, deren Energie E zu der Frequenz ν der Strahlung proportional ist. Diese Quanten bezeichnet man auch als Photonen. Die Proportionalitätskonstante wird als Planck'sches Wirkungsquantum h bezeichnet.

Es gilt:

$$E = h \nu \quad (9)$$

Mit E : *Energie* der Photonen, in J

h : *Planck'sches Wirkungsquantum*, in $J \cdot s$

Die Anzahl der Lichtquanten N , die im Zeitraum t emittiert werden, definieren die Strahlungsleistung Φ_E :

$$\Phi_E = \frac{N}{t} h \nu \quad (10)$$

Mit Φ_E : *Strahlungsleistung*, in W

N : *Anzahl* der Lichtquanten

t : *Zeit*, in s

Die Strahlungsleistung Φ pro Raumwinkel Ω ist definiert als Strahlungsintensität I :

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (11)$$

Mit I : *Strahlungsintensität*, in W/ sr

Ω : *Raumwinkel*, in sr

Wechselwirkung von Licht und Materie

Licht zeigt verschiedene Wechselwirkungen mit Materie, von denen einige in Abbildung 22 schematisch dargestellt sind. Einfallende Lichtstrahlen mit der Intensität I_0 können entweder direkt an der Oberfläche reflektiert werden, oder weiter in die Materie eindringen. Innerhalb der Materie kann es zu Wechselwirkungen kommen, oder der Lichtstrahl verlässt die Materie wieder (Transmission). Kommt es zu einer Wechselwirkung innerhalb der Materie, werden die Lichtstrahlen entweder gestreut oder absorbiert.

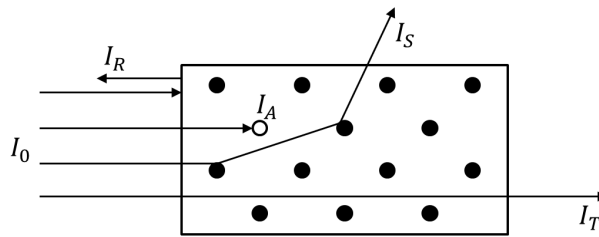


Abbildung 22: Wechselwirkung von Licht mit Materie

In Summe gilt:

$$I_0 = I_R + I_T + I_S + I_A \quad (12)$$

Mit I_0 : Intensität des einfallenden Lichts, in W/sr

I_R : Intensität des reflektierten Lichts, in W/sr

I_T : Intensität des transmittierten Lichts, in W/sr

I_S : Intensität des gestreuten Lichts, in W/sr

I_A : Intensität des absorbierten Lichts, in W/sr

Der Anteil der jeweiligen Wechselwirkung ist Wellenlängenabhängig. Es gilt also:

$$I_{0\lambda} = I_{R\lambda} + I_{T\lambda} + I_{S\lambda} + I_{A\lambda} \quad (13)$$

Mit Index λ : Wellenlängenabhängigkeit

Das Lambert-Beer'sche Absorptionsgesetz [49] beschreibt die Intensität des transmittierenden Lichts $I_{T\lambda}$ in Abhängigkeit von der Dicke der durchstrahlten Materieschicht d , der Stoffmengenkonzentration der wechselwirkenden Moleküle c_A , sowie einem stoffabhängigen Extinktionskoeffizienten ε_λ :

$$I_{T\lambda} = I_{0\lambda} \cdot \exp(-\varepsilon_\lambda c_A d) \quad (14)$$

Mit ε : Extinktionskoeffizient, in L/mol · cm

c_A : Stoffmengenkonzentration der wechselwirkenden Moleküle, in mol/cm

d : Schichtdicke, in cm

Unter Vernachlässigung der reflektierten und gestreuten Lichtanteile $I_{R\lambda}$ und $I_{S\lambda}$ berechnet sich der Anteil des absorbierten Lichtes zu:

$$I_{A\lambda} = I_{0\lambda} - I_{T\lambda} = I_{0\lambda} \cdot (1 - \exp(-\varepsilon_{\lambda} c_A d)) \quad (15)$$

Für kleine Stoffmengenkonzentrationen c_A und dünne Schichten d lässt sich dieser Ausdruck nach einer Reihenentwicklung, deren höhere Glieder vernachlässigt werden, vereinfachen zu:

$$I_{A\lambda} = I_{0\lambda} \varepsilon_{\lambda} c_A d \quad (16)$$

Der Anteil der absorbierten Strahlung $I_{A\lambda}$ verhält sich somit näherungsweise linear zur Schichtdicke d .

Optische Anregung von Materie

Die Elektronen in der Atomhülle können verschiedene diskrete Energieniveaus E_i annehmen. Durch Energieaufnahme bzw. Energieabgabe sind Übergänge zwischen diesen Energieniveaus möglich. Der Wechsel von einem Energieniveau E_i auf ein anderes Energieniveau E_j resultiert so in einer Energiedifferenz ΔE :

$$\Delta E = E_i - E_j \quad (17)$$

Mit ΔE : *Energiedifferenz des Übergangs, in J*

E_i : *Energieniveau, in J*

E_j : *Energieniveau, in J*

Der Energietransfer kann unter anderem durch die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung (z.B. Licht) und der Atomhülle geschehen. Nach Planck kann einem Photon dann einer der Energiemenge ΔE zugehörige Frequenz ν_{ij} zugeordnet werden:

$$\Delta E = h\nu_{ij} \quad (18)$$

Mit ν_{ij} : *Frequenz des mit der Energiedifferenz ΔE korrespondierenden Photons, in s^{-1}*

Die Aufnahme eines Photons in die Elektronenhülle wird als Absorption, die Abgabe als Emission bezeichnet. Die Fluoreszenz ist ein Sonderfall der Emission. In technischen Anwendungen sind die fluoreszierenden Stoffe häufig Moleküle. Die hier angestellten Überlegungen zu den Vorgängen in der Elektronenhülle von Atomen lassen sich darauf übertragen. Zur Veranschaulichung der auftretenden Phänomene in großen Molekülen ist das sogenannte Jablonski-Diagramm [50] besonders geeignet, siehe Abbildung 23.

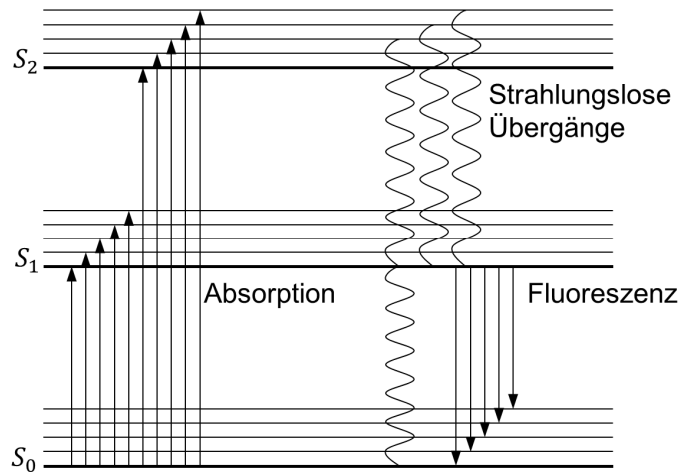


Abbildung 23: Jablonski-Diagramm

Die Anzahl der Elektronen in stabilen Molekülen ist für gewöhnlich gerade. Im tiefsten Energiezustand ordnen sie sich jeweils paarweise so an, dass ihr Spin einander entgegengesetzt ist. Dieser Zustand wird als Singulett-Zustand bezeichnet und im Jablonski-Diagramm als Linie dargestellt und mit S_i gekennzeichnet (i kennzeichnet hierbei das Energieniveau des jeweiligen Zustandes). Bedingt durch Rotations- und Verschiebungsenergie durch Schwingungen des Moleküls sind Zustände oberhalb der jeweiligen elektronischen Singulett-Grundzustände möglich, die ebenfalls durch Linien gekennzeichnet sind. Wird eines der beiden Elektronen aus dem Grundzustand angeregt, kann es entweder seinen Spin beibehalten, dann liegt ein angeregter Singulett-Zustand S_{i+1} vor, oder sein Spin verändert sich, was einem sogenannten Triplett-Zustand entspricht. Dieser spielt bei der Betrachtung der Phosphoreszenz eine Rolle und auf ihn soll hier nicht näher eingegangen werden. Durch Zusammenstöße mit benachbarten Molekülen können die angeregten Moleküle ihre Rotations- und Verschiebungsenergien austauschen. Der spontane Übergang eines Elektrons aus einem angeregten Singulett-Zustand S_{i+1} in einen niedrigeren Singulett-Zustand S_i unter Abgabe eines Photons wird Fluoreszenz genannt. Fallen Elektronen ohne die Emission eines Photons auf den darunterliegenden Singulett-Zustand S_i zurück, spricht man von Deaktivierung. Des Weiteren finden in der Elektronenhülle Verschiebungsvorgänge (engl. Internal Conversion) aus höheren Energieniveaus statt, die ebenfalls strahlungslos erfolgen.

Bedingt durch den möglichen Energieaustausch in den höheren Energieniveaus unterscheidet sich die freiwerdende Energiemenge E_E beim Übergang vom S_{i+1} in den S_i Zustand, die in Form von Fluoreszenz auftritt, von der bei der Absorption aufgenommene Strahlungsenergie E_A . Relativbewegungen zwischen den einzelnen Atomen des Moleküls sowie die Rotation des Moleküls um sich selbst liefern die Beiträge E_v und E_r :

$$E_E = E_A + E_v + E_r \quad (19)$$

Mit E_E : Energie des emittierten Photons, in J

E_A : Energie des absorbierten Photons, in J

E_v : Energie durch Relativbewegung des Moleküls, in J

E_r : Energie durch Rotation des Moleküls, in J

Da sich die Energiemenge des emittierten und des absorbierten Photons unterscheiden, können ihnen verschiedene Wellenlängen zugeordnet werden:

$$E_E = h\nu_E = h \frac{c}{\lambda_E} \quad (20)$$

$$E_A = h\nu_A = h \frac{c}{\lambda_A} \quad (21)$$

Mit ν_E : Frequenz der abgegebenen Strahlung, in s^{-1}

ν_A : Frequenz der aufgenommenen Strahlung, in s^{-1}

λ_E : Wellenlänge der abgegebenen Strahlung, in m

λ_A : Wellenlänge der aufgenommenen Strahlung, in m

Die vielfältigen möglichen Übergänge zwischen Energieniveaus in der Elektronenhülle von großen Molekülen führen bei der Fluoreszenz im Gegensatz zur atomarer Fluoreszenz und kleinen Molekülen, die nur wenige diskretere Energieniveaus aufweist, zu kontinuierlichen Spektren. Abbildung 24 zeigt das Absorptions- und Emissionsspektrum eines typischen Fluoreszenzfarbstoffs.

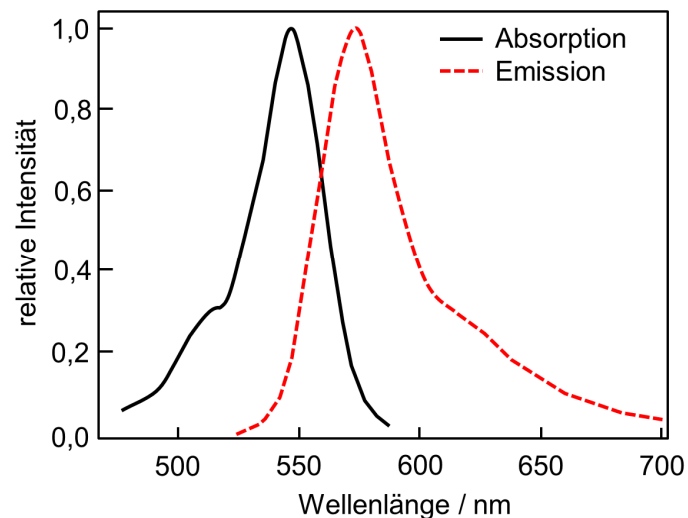


Abbildung 24: Absorptions- und Emissionsspektrum von Rhodamin B

Je nach ausgetauschter Energie findet Emission bei längeren oder kürzeren Wellenlängen als die Absorption statt. Da es zwischen Absorption und Emission jedoch zu meist zu einem Energieverlust kommt, erfolgt ein Großteil der Emission bei längeren Wellenlängen. Das Emissionsspektrum ist gegenüber dem Absorptionsspektrum somit auf der Wellenlängenskala nach rechts verschoben („Rot“-Verschiebung).

Quantenausbeute und Quenching

Bedingt durch strahlungslose Übergänge führt nicht jedes absorbiertes Photon zur Emission eines Fluoreszenzlichtphotons. Der Wirkungsgrad, mit dem Fluoreszenz stattfindet, nennt man Quantenausbeute ϕ_0 . Sie wird definiert als Verhältnis der ausgestrahlten Fluoreszenzlichtphotonen N_F zur Anzahl der absorbierten Photonen N_A :

$$\phi_0 = \frac{N_F}{N_A} \quad (22)$$

Mit ϕ_0 : *Quantenausbeute*

N_F : *Anzahl der Fluoreszenzlichtquanten*

N_A : *Anzahl der absorbierten Quanten*

Im Betrachtungszeitraum dt ist die Anzahl N der Quanten in etwa proportional zur Strahlungsleistung und damit zur Intensität I . Für $\lambda_A \approx \lambda_E$ gilt näherungsweise:

$$\phi_0 \approx \frac{I_F}{I_A} \quad (23)$$

Neben innermolekularen Vorgängen können auch Wechselwirkungen mit anderen Molekülen zu einer verringerten Quantenausbeute führen. Diese Vorgänge werden als Anregungslöschung (engl. „Quenching“) bezeichnet.

Hierbei wird zwischen Eigen- und Fremdlöschung unterschieden:

Bei Eigen- oder Selbstlöschung findet die Wechselwirkung zwischen gleichartigen Molekülen statt. Bei höheren Konzentrationen der fluoreszierenden Verbindungen kann es zur Bildung von nichtfluoreszierenden Doppelmolekülen kommen (Konzentrationslöschung). Andere Verbindungen reagieren beim Zusammenstoß mit gleichartigen Molekülen mit einer verkürzten Lebensdauer des angeregten Zustands, was ebenfalls zur Abnahme der Fluoreszenzintensität führt.

Bei der Fremdlöschung sind es andersartige Stoffe, die mitunter in sehr geringen Konzentrationen bereits Fluoreszenzabschwächung verursachen, ohne dabei das Fluoreszenzmolekül dauerhaft zu verändern. Vielmehr bildet der Löschstoff mit dem Fluoreszenzmolekül reversibel fluoreszenzunfähige Verbindungen oder es kommt im angeregten Zustand zu einer Wechselwirkung, die einen strahlungslosen Energieaustausch oder den Übergang in den Triplett-Zustand ermöglicht [51].

Für ein angeregtes Farbstoffmolekül gibt es somit drei Wege zurück in den Grundzustand:

- Die Energieabgabe in Form eines Photons.
- Die strahlungslose Energieabgabe in Form von Wärme.
- Der Energieübertrag auf ein Quenchmolekül (Quenching).

Mit Hilfe der Stern-Volmer-Gleichung [52] lässt sich der Einfluss des Quenchings quantifizieren. Hierzu wird eine Reaktionskonstante k_Q definiert, die die Kinetik des Energieübertrags auf den Quencher beschreibt. Diese ist von der Konzentration des Quenchers c_Q abhängig.

Aus der quenchfreien Quantenausbeute ϕ_0 wird die quenching-behaftete Quantenausbeute ϕ_Q folgendermaßen definiert:

$$\phi_Q = \phi_0 (1 + \tau_0 k_Q c_Q)^{-1} \quad (24)$$

Mit ϕ_Q : *Quantenausbeute mit Quenching, dimensionslos*

τ_0 : *Fluoreszenzlebensdauer, in s*

k_Q : *Reaktionskonstante, in $1/\text{mol} \cdot \text{s}$*

c_Q : *Konzentration des Quenchers, in mol/l*

Neben der Konzentration des Quenchers c_Q haben die Viskosität sowie die Temperatur der Lösung einen Einfluss auf die Quantenausbeute. Für die optischen Untersuchungen kommt in dieser Arbeit Motoröl als Lösungsmittel für Fluoreszenzfarbstoffe zum Einsatz. Das Öl weist eine starke Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur auf. Die Einflüsse von Viskosität und Temperatur auf den Quenchvorgang sind somit überlagert und durch eine Untersuchung der temperaturabhängigen Fluoreszenzeigenschaften des fluoreszenzmarkierten Öls wird somit auch die viskositätsabhängige Änderung der Fluoreszenz erfasst.

Schichtdickenmessung in dünnen Schichten

Ist eine Flüssigkeitsschicht mit einer bestimmten Konzentration c_A eines Stoff versehen, der Licht absorbiert und als Fluoreszenzlicht wieder abgeben kann, so können anhand der Fluoreszenzintensität Rückschlüsse auf die Dicke d der Flüssigkeitsschicht gezogen werden.

Anregungslicht der Intensität $I_{0\lambda}$ wird abhängig von der Schichtdicke absorbiert. Hierbei seien die Schichtdicke d und die Farbstoffkonzentration c_A gering. Es gilt daher die vereinfachte Form des Lambert-Beer'schen Gesetzes.

$$I_{A\lambda} = I_{0\lambda} \varepsilon_{\lambda} c_A d \quad (25)$$

Das Maximum des aufgrund der Anregung durch das absorbierte Licht abgegebene Fluoreszenzlicht (Emission) unterscheidet sich spektral vom verwendeten Anregungslicht (Absorption), siehe Abbildung 24. Es gilt:

$$|\lambda_E - \lambda_A| > 0 \quad (26)$$

Zudem sei das Anregungslicht von einer bestimmten Wellenlänge (monochromatisch). Das Fluoreszenzlicht erscheint bei Verwendung von mehratomigen Fluoreszenzfarbstoffen als Bandspektrum. Die Intensität des emittierten Fluoreszenzlichts $I_{F\lambda}$ ist damit als Integral über den Wellenlängen von λ_{E1} bis λ_{E2} zu ermitteln und über die Quantenausbeute ϕ_Q folgendermaßen mit der Intensität des absorbierten Lichts $I_{A\lambda_A}$ verknüpft:

$$\int_{\lambda_{E1}}^{\lambda_{E2}} I_{F\lambda} \delta\lambda = \phi_{Q\lambda_A} I_{A\lambda_A} \quad (27)$$

Mit $\phi_{Q\lambda_A}$: *Quantenausbeute* bei der Anregungswellenlänge λ_A

$I_{A\lambda_A}$: *Intensität* des absorbierten Anregungslichts, in W/sr

Mit (25) folgt daraus die Grundgleichung für die Bestimmung der Schichtdicke d :

$$\int_{\lambda_{E1}}^{\lambda_{E2}} I_{F\lambda} \delta\lambda = \phi_{Q\lambda_A} I_{0\lambda_A} \varepsilon_{\lambda_A} c_A d \quad (28)$$

Das Fluoreszenzlicht wird auf einem geeigneten Detektor gesammelt. Dieser Vorgang erfasst immer nur einen Teil des emittierten Lichts. Dabei wird die Sammeleffizienz θ_S als Verhältnis von detektierter Intensität $I_{F\lambda_E, det}$ zur an der Messstelle emittierten Intensität $I_{F\lambda_E}$ definiert.

$$\theta_S = \frac{I_{F\lambda, det}}{I_{F\lambda}} \quad (29)$$

Mit: θ_S : Sammeleffizienz

$I_{F\lambda, det}$: Detektierte Fluoreszenzintensität, in W/sr

$I_{F\lambda}$: Emittierte Fluoreszenzintensität, in W/sr

Für die Fluoreszenzintensität am Detektor gilt somit:

$$\int_{\lambda_{E1}}^{\lambda_{E2}} I_{F\lambda, det} \delta\lambda = \theta_S \phi_{Q\lambda_A} I_{0\lambda_A} \varepsilon_{\lambda_A} c_A d \quad (30)$$

Um eine Beeinträchtigung des Detektors durch reflektiertes oder gestreutes Anregungslicht $I_{0\lambda_A}$ zu verhindern, muss dieses abgetrennt werden. Hierzu nutzt man die spektrale Verschiebung hin zu längeren Wellenlängen mit Hilfe von spektralen Filtern. Obwohl die Fluoreszenzanregung breitbandig erfolgen kann, werden häufig monochromatische Lichtquellen einer bestimmten Wellenlänge verwendet, weil sie eine gute Abtrennbarkeit des Anregungslichts gewährleisten.

Abbildung 25 zeigt ein exemplarisches Spektrum für die Anregung eines Fluoreszenzfarbstoffs mit monochromatischem Licht und der Abtrennung von Fluoreszenzlicht mit einem Bandpassfilter. Das Bandpassfilter ist dabei so ausgelegt, dass Fluoreszenzlicht im Bereich der maximalen Fluoreszenzintensität zum Detektor gelangen kann. Die Wellenlänge des Anregungslichts liegt jedoch nicht exakt im Absorptionsmaximum des Farbstoffs. Die verfügbaren Laserwellenlängen schränken die freie Auswahl hier ein.

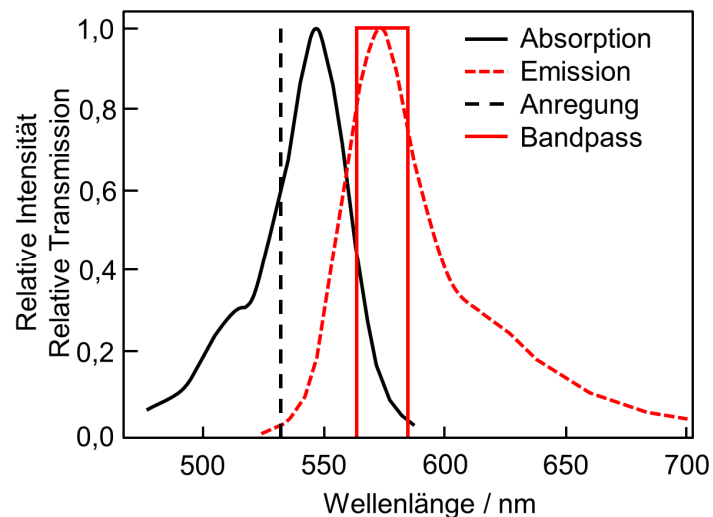


Abbildung 25: Spektrale Abtrennung des Fluoreszenzlichts durch Filter

Bei der Verwendung eines Bandpass-Filters gelangt nur der spektrale Bereich des Fluoreszenzlichts zum Detektor, der das Filter im Wellenlängenbereich zwischen λ_{E1} und λ_{E2} mit der wellenlängenabhängigen Transmission T_λ passieren kann.

$$\int_{\lambda_{E1}}^{\lambda_{E2}} I_{F\lambda,det} T_{\lambda} \delta_{\lambda} = \theta_S \phi_{Q\lambda_A} I_{0\lambda_A} \varepsilon_{\lambda_A} c_A d \quad (31)$$

Mit T_{λ} : wellenlängenabhängige *Transmission* des Filters, in %

Unter der Annahme, dass die Sammeleffizienz θ_S , die Quantenausbeute ϕ_Q , die Intensität des Anregungslichts $I_{0\lambda_A}$, der Extinktionskoeffizient ε_{λ} sowie die Konzentration des absorbierenden Mediums c_A im beobachteten Volumen konstant sind, hängt die Intensität des detektierten Fluoreszenzlichts $\int_{\lambda_{E1}}^{\lambda_{E2}} I_{F\lambda,det}$ nur von der Schichtdicke d ab:

$$\int_{\lambda_{E1}}^{\lambda_{E2}} I_{F\lambda,det} \delta_{\lambda} \propto d \quad (32)$$

Diese Überlegungen gelten für den einmaligen Durchtritt des Anregungslichts durch die zu vermessende Schicht. Befindet sich die fluoreszierende Schicht jedoch auf einem reflektierenden Untergrund, wird sowohl das Anregungslicht als auch das Fluoreszenzlicht reflektiert. Das Anregungslicht hat dadurch die Möglichkeit weitere Farbstoffmoleküle anzuregen. Zusätzlich dazu wird das Fluoreszenzlicht in Richtung Detektor reflektiert. Die möglichen Vorgänge sind in Abbildung 26 dargestellt.

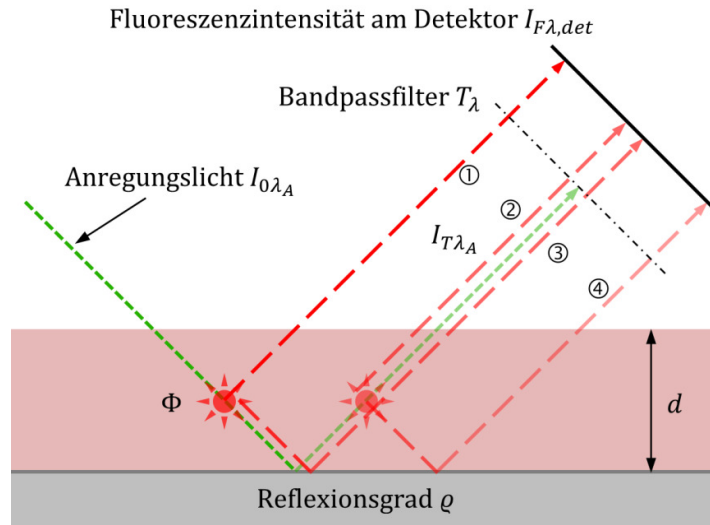


Abbildung 26: Fluoreszenzintensität bei Reflexion am Hintergrundmaterial: ① Direktes Fluoreszenzlicht ohne Reflexion, ② Fluoreszenzlicht aufgrund von reflektiertem Laserlicht, ③ Reflektiertes Fluoreszenzlicht, ④ Reflektiertes Fluoreszenzlicht aufgrund von reflektiertem Laserlicht

Zur besseren Sichtbarkeit treffen die einzelnen Strahlen im Bild unter einem Winkel von 45° auf die fluoreszierende Schicht und Brechungseffekte an der Grenzfläche werden vernachlässigt. Ohne Reflexion durchläuft das Anregungslicht die Schicht lediglich einmal und das Fluoreszenzlicht gelangt nur auf direktem Weg zum Detektor (Strahl ①). Sobald jedoch ein reflektierendes Hintergrundmaterial die Schicht begrenzt, kann weiteres Fluoreszenzlicht zum Detektor reflektiert werden (Strahl ③). Zudem hat

das ebenfalls reflektierte Laserlicht die Chance weitere Farbstoffmoleküle zur Fluoreszenz anzuregen. Das dadurch frei werdende zusätzliche Fluoreszenzlicht kann nun wieder auf direktem Weg (Strahl ②), oder über die Reflexion am Hintergrundmaterial zum Detektor gelangen (Strahlen ④).

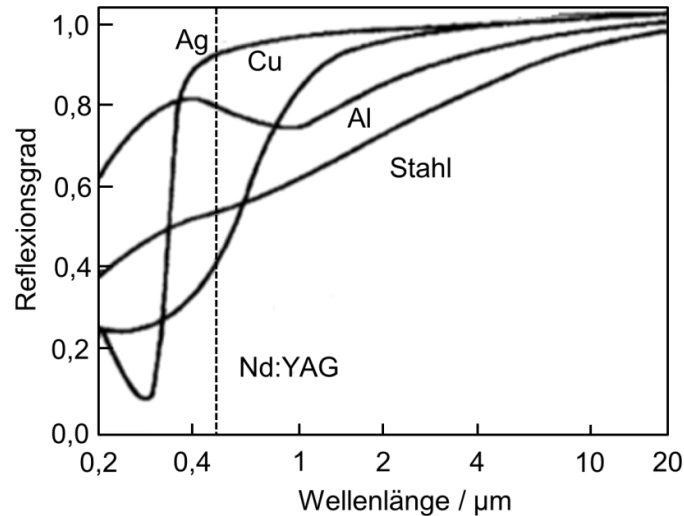


Abbildung 27: Wellenlängenabhängiger Reflexionsgrad verschiedener Metalle und Emissionswellenlänge des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers (532 nm) [53]

Der wellenlängenabhängige Reflexionsgrad verschiedener Metalle ist in Abbildung 27 dargestellt. Stahl und Aluminium besitzen im sichtbaren Bereich Reflexionsgrade um etwa 0,5. In der Kolbengruppe finden sich eine Reihe unterschiedlicher Materialien und somit unterschiedliche Reflexionsgrade. Der Kolben besteht aus Aluminium, während die Kolbenringe aus einer Eisenlegierung gefertigt werden und zudem meist noch mit einer Beschichtung versehen sind. Eine Berücksichtigung des Reflexionsgrads des optischen Hintergrunds ist für eine absolute Bestimmung der Schichtdicke somit auf jeden Fall notwendig. Will man die Schichtdicke über einen größeren Bereich beobachten, ist zudem die Annahme einer konstanten Verteilung des Anregungslichts $I_{0\lambda_A}$ unzutreffend. Häufig werden Laser als Lichtquelle verwendet. Deren Strahlprofil weist meist eine annähernd Gaußförmige Verteilung vom Zentrum zur Peripherie auf. Diese wird unweigerlich auch auf der Messstelle abgebildet. Gleichzeitig weicht die Sammel-effizienz θ_s der einzelnen Bildpunkte auf dem Detektor (Pixel) leicht voneinander ab. Zusätzlich kommt es zu einem Signal, wenn der Detektor nicht beleuchtet wird (Dunkelstrom), das durch eine Hintergrundkorrektur korrigiert werden kann. Eine Korrektur der Sammeleffizienz und der ungleichmäßigen Lichtverteilung über den Messbereich wird als „Flachfeldkorrektur“ bezeichnet, siehe Abschnitt 5.2.2.

3.1.2 Stand der Technik

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Anwendung von laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) an Tribometern bzw. Modellexperimenten und optisch zugänglichen Motoren zur Vermessung von Ölfilmen in tribologischen Kontakten. Die Visualisierung von Kraftstoffschichten wird im Anschluss separat behandelt.

Ölfilmdickenmessung an Tribometern und Modelltests

Optische Untersuchungsmethoden bieten grundsätzlich die Möglichkeit einen ausgedehnten Bereich des tribologischen Kontakts zu beobachten und so Informationen zur Verteilung des Schmiermittels zu erhalten. Dies erfordert den Einsatz von flächigen optischen Zugängen (Fenster) und Detektoren. In frühen Arbeiten oder bei der Verwendung von Lichtleitfasern zur Erschließung des optischen Zugangs werden Photomultiplier zur Erfassung des Fluoreszenzlichts eines einzelnen Messpunktes eingesetzt. So untersuchten Ford und Foord [54] freie Ölfilme auf Metalloberflächen für die Anwendung in Rollenlagern. Im Rahmen ihrer Arbeit untersuchen Ford und Foord verschiedene Lichtquellen. Eine 100 W Quecksilberdampflampe, deren Emissionsmaximum bei 365 nm liegt, wird anfangs zur Erzeugung des Anregungslichts verwendet, das durch ein Linsensystem auf die punktförmige Messstelle fokussiert wird. Das Fluoreszenzlicht wird ebenfalls über Linsen dem Detektor zugeführt. Dieser besteht aus einem Photomultiplier dem auf die jeweilige Emissionswellenlänge angepasste Filter vorgeschaltet sind. Als alternative Lichtquelle kommt ein He-Cd Laser mit 2 mW Ausgangsleistung bei 325 nm Emissionswellenlänge zum Einsatz. Ford und Foord stellen eine natürliche Fluoreszenz bei den untersuchten mineralischen Schmierölen fest. Dabei weisen die additivierten Maschinenöle im Vergleich zu den unadditivierten Basisölen eine deutlich stärkere Fluoreszenz aber auch ein ausgeprägtes Bleichungsverhalten auf. Dieses tritt als zeitliche Abnahme der Fluoreszenz unter UV-Bestrahlung in Erscheinung. Mit Fluoreszenzfarbstoff versetztes Grundöl zeigt sich deutlich bleichungsstabiler und erlaubt eine Filmdickenmessung bis zu 100 µm. Zuletzt ändern Ford und Foord die Emissionswellenlänge des Lasers auf 441,6 nm und bemerken deutliche Vorteile des sichtbaren Strahls aufgrund der tieferen Penetration im Messmedium und der damit verbundenen Messbereichserweiterung hin zu dickeren Ölschichten.

Ein He-Cd-Laser mit 441,6 nm Emissionswellenlänge wird auch von Dearlove et al. [55] in Verbindung mit $5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ Coumarin als Fluoreszenzfarbstoff zur Bestimmung der Ölfilmdicke an einem Kolbenringtribometer verwendet. Der optische Zugang zum Ölfilm wird durch Quarzfenster erreicht, während das Anregungs- und Emissionslicht durch Lichtleitfasern zur Messstelle geleitet werden. Dadurch wird die Messung ebenfalls auf eine punktförmige Erfassung der Ölfilmdicke beschränkt. Zur Absolutwertkalibrierung nutzten Dearlove et al. eine Kalibriernut definierter Tiefe, die während des Versuchs den Messbereich passiert. Ein Vorteil der Verwendung eines Laserfarbstoffs ist die hohe Stabilität gegenüber Ausbleichung.

Nakayama et al. [56] setzen ein sehr ähnliches System zur Ölfilmdickenmessung in einem hydrodynamischen Gleitlager ein. Für die Kalibrierung nutzten sie sowohl eine externe Kalibriervorrichtung als auch eine Kalibriernut für eine In-situ-Kalibrierung während der Messung.

Poll et al. [57] untersuchen mit Hilfe der Fluoreszenz die Ölfilmverteilung im Dichtbereich eines Radialwellendichtringes. Der optische Zugang wird über ein rotierendes Quarzglasrohr, auf dem der Dichtring läuft, gewährleistet. Das Schmieröl wird mittels eines nicht näher definierten Farbstoffs zur Risserkennung fluoreszenzmarkiert. Poll et al. leiten den mittels Bandpass gefilterten nahen UV- und blauen Anteil des Spektrums einer Quecksilberdampflampe derart in das Quarzglasrohr, dass dieses in dessen Innern total reflektiert wird. Das Fluoreszenzlicht wird über einen Spiegel im Innern des Quarzrohres zu einer CCD-Kamera geleitet, der ein Bandpassfilter zur Abtrennung des Anregungslichts vorgeschaltet ist. Poll et al. gelingt so eine flächige Darstellung der Schmierfilmdicke. Zur Kalibrierung des Messsystems wird ein flaches Metallstück an Stelle des Radialwellendichtrings gegen das Quarzglasrohr gedrückt. Der dadurch entstandene Spalt wird mit fluoreszierendem Öl gefüllt und die Fluoreszenzintensität mit der Schmierpalthehöhe verglichen.

Sato et al. [58] verwenden die LIF-Technik ebenfalls zur Visualisierung der Ölverteilung im Dichtbereich eines Radialwellendichtrings. Der optische Zugang wird wie bei der Arbeit von Poll et al. durch ein Quarzglasrohr erreicht, auf dem der Radialwellendichtring läuft. Anders als Poll et al. beleuchten Sato et al. den Ölfilm direkt ohne die Ausnutzung von Totalreflexion. Auch die Beobachtung der Filmverteilung erfolgt direkt, ohne den Einsatz eines Spiegels. Als Fluoreszenzfarbstoff kommt Coumarin in einer Konzentration von $5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ zum Einsatz, das durch einen 15 mW Halbleiterlaser mit 427 nm Wellenlänge angeregt wird. Eine Kalibrierung zur quantitativen Filmdickenauswertung führen Sato et al. nicht durch.

Sugrimura et al. [59] verwenden 2% Pyren als Fluoreszenzfarbstoff in Kombination mit einer Quecksilberdampflampe an einem Ball-on-Disk Tribometer. Durch den Vergleich des Fluoreszenzsignals mit der Bauteilgeometrie gelingt ihnen eine Absolutwertkalibrierung. Filmdicken ab 30 nm können sichtbar gemacht werden, doch überlagerte Interferenzeffekte erschweren die Messung bei sehr dünnen Schichten.

Myant et al. [60] verwenden einen diodengepumpten Festkörperlaser mit 532 nm Emissionswellenlänge in Kombination mit 0,4% Eosin als Fluoreszenzfarbstoff zur Untersuchung des Ölfilmverhaltens zwischen einer Polymerkugel und einer rotierenden Quarzglasscheibe. Hintergrundeffekte werden durch die Aufnahme eines Hintergrundbildes kompensiert. Zur Absolutwertkalibrierung vergleichen Myant et al. die Probengeometrie im Stillstand mit dem Fluoreszenzbild. Aufgrund von Bildrauschen wird die minimal messbare Filmdicke mit 0,3 μm angegeben.

Hidrovo und Hart [61] verwenden eine Mischung aus zwei Fluoreszenzfarbstoffen deren Emissionslicht mit zwei unterschiedlichen Kameras erfasst werden. Diese sind mit einem auf die jeweilige Emissionswellenlänge abgestimmten Bandpassfilter versehen. Durch die Auswertung des Verhältnisses der beiden Signale kann der Einfluss der Anregungsintensität und des Reflexionsgrads des optischen Hintergrundes auf das Fluoreszenzsignal korrigiert werden.

Die LIF-Technik stellt somit ein erprobtes und robustes Instrument bei der Untersuchung von tribologischen Kontakten dar. Eine Quantifizierung der Messungen findet jedoch selten statt. Ihr Vorteil ist flächige Information zur Ölverteilung und der Ölmenge sowie die Anwendbarkeit bei realen Kontaktgeometrien zu liefern. Diesbezüglich ist sie den elektrischen Messverfahren bzw. der interferenzbasierten Messtechnik überlegen. Prinzip bedingt muss jedoch ein Teil des tribologischen Kontakts durch den optischen Zugang ersetzt werden. Dabei ist die Frage nach der Übertragbarkeit der optischen Messungen auf den realen tribologischen Kontakt bleibt bisher ungeklärt.

Ölfilmdickenmessung an Motoren

Erste Untersuchungen zu den Schmierverhältnissen in der Kolbengruppe mit Hilfe von fluoreszierendem Öl wurde von Greene [62] unternommen. Neben einer weiteren auf Totalreflexion basierenden Messmethode verwendet er den UV-Anteil einer Gasentladungslampe zur optischen Anregung von Öl ohne Farbstoff in einem Einzylindermotor mit Glaszylinder. Eine kommerzielle Kinofilmkamera dient zur Aufnahme der Fluoreszenzbilder.

Ting [63] nutzt die Erkenntnisse von Ford und Foord [54] und verwendet einen He-Cd Laser mit 442 nm Emissionswellenlänge zur Fluoreszenzanregung des ungefärbten Ölfilms in einem optisch zugänglichen Motor mit einem Polycarbonat-Zylinder. Die Erfassung der relativen Ölfilmdicke erfolgt trotz des großflächigen optischen Zugangs lediglich an einem Messpunkt. Auf eine Kalibrierung der Messtechnik verzichtet Ting.

Diese wird von Hoult et al. [64, 65] durchgeführt. Sie verwenden ebenfalls einen He-Cd Laser mit 442 nm Emissionswellenlänge und Coumarin 523 in einer Konzentration von $5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ als Fluoreszenzfarbstoff. Als optischer Zugang dient ein rundes Quarzglasfenster mit 8 mm Durchmesser, das in die Zylinderwand eingelassen ist. Die Ölfilmdicke wird in einem Messfleck mit 0,1 mm Durchmesser mit Hilfe eines Photomultipliers bestimmt. Hoult et al. stellen eine starke Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität von der Öltemperatur und einen Bleichungseffekt bei langer Bestrahlung des Öls fest. Für die Kalibrierung nutzen sie sowohl eine externe Kalibriervorrichtung als auch die Bauteilgeometrie während des Motorbetriebs. Die Ölfilmdicke zwischen Ring und Zylinderwand wird mit etwa 2 μm angegeben. In einer weiteren Veröffentlichung von Shaw et al. [66] wird die Technik um eine Lichtführung mit einer Glasfaser erweitert, die später von Takiguchi et al. [67] verwendet wird. Brown et al. [68] und Arcoumanis et al. [69] verwenden ebenfalls Glasfasern zur Lichtführung, sie verzichten jedoch auf einen Fluor-

reszenzfarbstoff und regen das undotierte Motoröl mit einem Argon-Ionen-Laser bei 488 nm zur Fluoreszenz an.

Die Nachteile einer punktförmigen Erfassung der Ölfilmdicke führten zur Entwicklung von kamerabasierten Messsystemen. Bahnbrechende Untersuchungen werden von Inagaki et al. [70] durchgeführt. Sie setzen sowohl einen kompletten Quarzglaszylinder für geschleppte Untersuchungen, als auch einen Graugusszylinder mit länglichen Saphirfenstern (4×71 mm²) auf Druck- und Gegendruckseite für gefeuerte Versuche ein. Die zweidimensionale Ölverteilung wird mittels CCD-Kamera erfasst. Als Fluoreszenzfarbstoff kommt Coumarin 6 in einer Konzentration von $7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ zum Einsatz, das durch eine Xe-Blitzlampe mit 3 J Pulsenergie angeregt wird. Um die örtliche Verteilung des Blitzlampenlichts zu ermitteln, setzen Inagaki et al. fluoreszierende Vinylfolien ein, die an Stelle des Ölfilms für eine konstante Schichtdicke sorgen (Flachfeldkorrektur). Ein Stück dieser Folie im Aufnahmebereich ermöglicht während der Messung die Berücksichtigung der Puls-zu-Puls Abweichung der Blitzlampe. Die Absolutwertkalibrierung erfolgt außerhalb des Motors anhand von definierten Schmierspaldicken in Kalibriervorrichtungen. Die gemessenen Ölfilmdicken bewegen sich im Bereich von 2-25 µm im Ringfeld und bis über 30 µm im Bereich des Kolbenhemdes.

Mulgrave [71] untersucht, basierend auf den Arbeiten von Hoult et al. [64, 65], die Möglichkeiten einer zweidimensionalen Erfassung der Ölfilmverteilung mit einer CCD-Kamera. Dies wird von Thirouard et al. [72, 73] an zwei optisch zugänglichen Einzylindermotoren erfolgreich umgesetzt. Zuerst testen sie das System an einem Diesel-Stromaggregat, das über ein Quarzfenster (Maße 8,6×20 mm²) in der Zylinderlaufbahn verfügt. Zudem kommt das System an einem Einzylinder-Ottomotor zum Einsatz, in dessen Graugusszylinder ein Saphirfenster (Maße 12×98,5 mm²) eingelassen ist. Die Position des Fensters kann durch Drehung des Zylinders um 180° zwischen der Druck- bzw. Gegendruckseite variiert werden. Zur Beleuchtung der Ölschicht kommt ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit 532 nm Emissionswellenlänge und 30 mJ Pulsenergie zum Einsatz, der zusammen mit der CCD-Kamera in der Lage ist, ein Bild pro Arbeitsspiel aufzunehmen. Der Laserstrahl wird über ein Linsensystem 10-fach aufgeweitet und über einen Strahlteilerwürfel auf die Messstelle gespiegelt. Da das Fenster deutlich höher als der Strahldurchmesser ist, kann während der Messung nur ein Teil der Fensterfläche beleuchtet werden. Das Motoröl wird mit einer Mischung aus zwei Laserfarbstoffen versetzt, die auf die Anregung mit der 532 nm Laser-Lichtquelle zugeschnitten sind und in Kombination mit einem schmalbandigen Bandpassfilter die Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz reduzieren sollen. Dieser Ansatz wird als „emission reabsorption“ bezeichnet [73]. Es kommen jeweils $1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 zum Einsatz. Zur Abschätzung der auftretenden Ölfilmdicken verwenden Thirouard et al. die Bearbeitungsmarken auf dem Kolbenhemd. Eine genauere Absolutwertkalibrierung findet nicht statt, da der Schwerpunkt der Arbeiten bei der Entschlüsselung von Öltransportvorgängen liegt.

Baba et al. [74, 75] verwenden ein ähnliches optisches System an einem optischen Einzylindermotor mit Saphirzylinder. Als Fluoreszenzfarbstoff kommt Rhodamin B in Konzentrationen von 0,1 g/l bzw. 0,5 g/l zum Einsatz, das ebenfalls von einem Nd:YAG-Laser bei 532 nm angeregt wird. Die Kalibrierung der optischen Messtechnik erfolgt sowohl außerhalb des Motors anhand eines definierten Kalibrierkeils, als auch im Motor mit Hilfe von durch Präzisionsfolien eingestellten, definierten Schichtdicken. Neu ist die Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Öls auf dem Kolben durch den Vergleich zweier Bilder, die in kurzer zeitlicher Folge aufgenommen wurden. Die zurückgelegte Strecke Δs von markanten Strukturen in einem bestimmten Zeitintervall Δt zwischen den Aufnahmen ist dabei ein Maß für die jeweilige Geschwindigkeit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$. Durch die Auswertung von markanten Ölstrukturen können Baba et al. auf die sonst übliche Verwendung von markierenden Partikeln (sog. Seedings) verzichten. Diese könnten zu erhöhtem Verschleiß des Motors führen.

Die qualitative Bildgebung der Ölverteilung in der Kolbengruppe stellt den aktuellen Stand der Technik dar. Die quantitative Vermessung der Ölfilmdicke in der Kolbengruppe hingegen wurde noch nicht zufriedenstellend gelöst. Die Kalibrierung der Messung erfolgte bisher entweder außerhalb des Motors, was die Frage der Übertragbarkeit aufkommen lässt oder anhand von Bearbeitungsspuren auf dem Kolben. Hierbei wurden jedoch bisher weder die Laser-Intensitätsverteilung noch die verschiedenen Reflexionsgrade in der Kolbengruppe berücksichtigt. Die Weiterentwicklung der Motorentechnik hin zu aufgeladenen und direkteinspritzenden Motoren erfordert die Weiterentwicklung des optischen Zugangs in Bezug auf die mechanische und thermische Festigkeit, um reale Betriebspunkte untersuchen zu können. Diesbezüglich ist auch die gleichzeitige Visualisierung von Kraftstoff und Öl in der Kolbengruppe von großer Bedeutung, um Phänomenen wie Ölverdünnung und den Einfluss von Schmieröl auf die Verbrennung analysieren zu können.

Visualisierung von Kraftstoffschichten mit Fluoreszenzverfahren

Le Coz et al. [76] untersuchen den Kraftstofffilm in einem Ansaugrohrmodell. Hierbei verwenden sie Lichtleitfasern für den optischen Zugang. Die Fluoreszenzanregung erfolgt mit einem He-Cd-Laser bei 441 nm. Iso-Oktan dient als Modellkraftstoff, der zur Fluoreszenzmarkierung mit verschiedene Verbindungen aus der Gruppe der Ketone versehen wird. Auswahlkriterien sind dabei die Fluoreszenzintensität sowie die Verdampfungseigenschaften der Mischung. Ziel ist, eine Fraktionierung der Komponenten zu vermeiden, was laut Le Coz et al. am besten durch eine Zugabe von 2% 2,3-Hexandion erreicht wird.

Hentschel et al. [77] verwenden ein ähnliches System. Als Lichtquelle verwenden sie jedoch einen Argon-Ionen-Laser mit einer Emissionswellenlänge von 457,9 nm. Ein Vergleich zwischen Messungen mit undotiertem Tankstellenkraftstoff und einer Mischung aus 4% 2,3-Hexandion in iso-Oktan zeigt ein höheres Fluoreszenzsignal des Tankstellenkraftstoffs. Bei der Filmdickenmessung im Saugrohr ergeben sich jedoch

unrealistisch hohe Messwerte. Hentschel et al. vermuten eine Aufkonzentrierung der fluoreszierenden Bestandteile im Tankstellenkraftstoff während der Verdampfung.

Park und Ghandhi [78] erweitern die Methode durch die Verhältnismessung der Schichttemperatur. Hierzu stimmen sie den Argon-Ionen-Laser auf eine Emissionswellenlänge von 488 nm ab und verwenden N,N'-bis(2,5-di-tert-butylphenyl)-3,4,9,10-Perylenedicarboximid (BTBP) als Fluoreszenzfarbstoff. Diese zeigt eine temperaturabhängige Rotverschiebung des Fluoreszenzspektrums, die durch Auswertung zweier spektraler Emissionsbereiche um 515 nm und um 532 nm zur Temperaturmessung herangezogen werden kann.

Cho et al. [79, 80] verwenden einen Quarzglasring unterhalb der Zylinderkopfdichtung als optischen Zugang, um die Messung des Kraftstoffeintrags auf die Brennraumwand eines Verbrennungsmotors zu ermöglichen. Zur Fluoreszenzanregung des undotierten Tankstellenkraftstoffs verwenden die einen Stickstoff-Laser mit einer Emissionswellenlänge von 337,1 nm. Das Anregungslicht wird über ein Prisma so in den Quarzglasring eingekoppelt, dass die Bedingungen für Totalreflexion erfüllt sind. Es wird somit nur an der Wand anhaftender Kraftstoff angeregt. Zur Erfassung der Fluoreszenz verwenden Cho et al. eine intensivierte CCD-Kamera.

Das Hauptproblem bei der Visualisierung von Kraftstofffilmen ist die korrekte Abbildung der Verdampfungseigenschaften. Undotierter Tankstellenkraftstoff fluoresziert bei der Bestrahlung mit UV-Licht stark [77]. Es sind jedoch nur bestimmte Fraktionen für die Fluoreszenz verantwortlich. Bei einem abdampfenden Film gibt das Fluoreszenzsignal somit nicht die verbleibende Filmdicke wieder. In der Literatur findet man somit eine Reihe von Modellkraftstoffen, bei denen der Zusammenhang aus Fluoreszenzintensität und Filmdicke besser wiedergegeben wird [76]. Diese Mischungen basieren meist auf iso-Oktan, dem eine fluoreszierende Substanz mit ähnlichem Siedepunkt beigemischt wird. Durch die geringe Molekülgröße dieser Substanzen wird zur optischen Anregung UV-Licht benötigt, was im Vergleich zu Systemen mit Wellenlängen im sichtbaren Bereich zu aufwendigen optischen Aufbauten (Bildverstärker, UV-Laser) führt. Wie oben erwähnt, ist die gleichzeitige Visualisierung von Öl- und Kraftstoffschichten wünschenswert. Die ebenfalls vorhandene UV-Anregbarkeit von handelsüblichem Motoröl [54, 62, 63, 68, 69] verhindert dabei die Trennbarkeit der Öl- und Kraftstofffluoreszenz. Daher ist in diesem Fall der Einsatz spezieller Motoröle notwendig. Die Spektroskopie zur spektralen Trennung von Öl- und Kraftstofffluoreszenz ist noch nicht abschließend erforscht.

3.2 Alternativen zur laserinduzierten Fluoreszenz

Neben der laserinduzierten Floreszenz gibt es eine Reihe von alternativen Verfahren zu Bestimmung von Filmschichtdicken. Die elektrischen Messverfahren arbeiten mit Sensoren, die auf verschiedenen physikalischen Prinzipien basieren. Daneben gibt es optische Verfahren, die nicht auf Fluoreszenz basieren. Auch diese sollen hier vorgestellt werden.

3.2.1 Elektrische Messverfahren

Bei den elektrischen Messverfahren kommen vor allem Wirbelstromsensoren und kapazitive Sensoren zum Einsatz.

Wirbelstromsensoren (induktive Sensoren)

Trifft ein magnetisches Wechselfeld auf einen elektrisch leitenden Körper, so werden in diesem Wirbelströme induziert, die durch Energieentzug auf das Magnetfeld rückwirken. Diesen Effekt macht sich die Wirbelstrom-Messtechnik zu Nutze. Abbildung 28 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Wirbelstrom-Messtechnik.

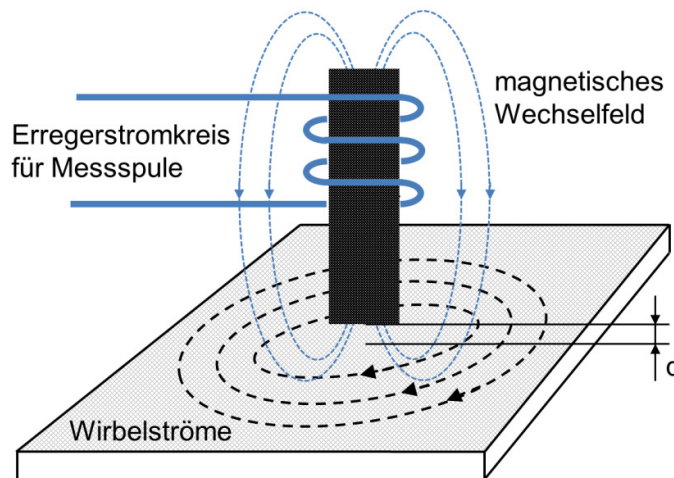


Abbildung 28: Prinzip der Wirbelstrom-Messtechnik

Der Sensor eines Wirbelstrom-Messsystems ist als Induktivität ausgeführt, die zusammen mit einer Kapazität einen LC-Schwingkreis bildet. Wird nun ein elektrisch leitendes Objekt der Sensorspule genähert, verstimmt sich die Resonanzfrequenz des LC-Schwingkreises, die als Maß des Abstandes von Objekt und Sensorspule dienen kann.

Für die Filmdickenmessung eignet sich dieses System, wenn der Film von zumindest einer Seite durch ein elektrisch leitfähiges Material begrenzt wird. Da nicht die Filmdicke selbst, sondern der Spalt zwischen zwei Objekten ermittelt wird, ist eine vollständige Füllung des Spaltes mit dem Fluid Bedingung für die korrekte Bestimmung der Filmdicke notwendig. Zudem ist bedingt durch die räumlich eng begrenzte Messung keine Aussage über die Verteilung des Fluides im Spalt möglich.

Die induktive Messtechnik wird von Wing und Saunders [81] zur Ermittlung des radialen Abstandes zwischen Kolbenring und Kolben eingesetzt. Unter Berücksichtigung von Zylinderdurchmesser und Kolbenringbreite schätzen sie die Ölfilmdicke ab. Dow et al. [82] platzieren die Sensoren in den Kolbenringen und bestimmen so den Spalt zwischen Zylinderwand und Kolbenring mit unter $3\text{ }\mu\text{m}$ an den Totpunkten und $8\text{ }\mu\text{m}$ im Bereich der höchsten Kolbengeschwindigkeit. Grice und Sherrington [83] messen den Ölfilm zwischen Zylinderwand und Kolben sowohl kapazitiv als auch induktiv und ermitteln so Ölfilmdicken im Bereich von $5 - 12\text{ }\mu\text{m}$. Der direkte Vergleich der beiden Messsignale ermöglicht ihnen eine Aussage über den Füllzustand des Schmierspalt, da das kapazitive Verfahren, im Gegensatz zum induktiven Verfahren, abhängig vom Füllzustand des Schmierspalt ist, siehe unten. Teilfüllungen erklären sie mit Mangelschmierung bzw. kavitationsbedingten Gasblasen. Golloch [84] setzt acht induktive Sensoren im ersten Kompressionsring ein und ermittelt damit Spaltmaße zwischen Kolbenring und Zylinderwand im Bereich von $5 - 25\text{ }\mu\text{m}$. Weimar [46] verwendet jeweils zwei Wirbelstromsensoren auf der Druck- und Gegendruckseite der Zylinder-Laufläche, wobei auf jeder Seite ein Sensor auf ferromagnetische Gegenkörper (Kolbenringe) und nicht-ferromagnetische Gegenkörper (Kolben) kalibriert ist. Bei der Abstandsmessung zu den Kolbenringen gibt Weimar die geringe Ringhöhe von $2,2\text{ mm}$ als kritisch an, da diese stets nur einen Teil des induktiven Sensors bedecken. Zudem stellt er eine große Temperaturdrift der eingesetzten Wirbelstromsensoren fest, die er korrigiert.

Kapazitive Sensoren

Die Kapazität eines Plattenkondensators ist abhängig von dessen Plattenfläche, der Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums und dem Plattenabstand. Kennt man nun Dielektrizitätskonstante und Plattenfläche, kann man den Plattenabstand bestimmen. Dieses Prinzip nutzt die kapazitive Schichtdickenmessung, deren Messprinzip in Abbildung 29 dargestellt ist.

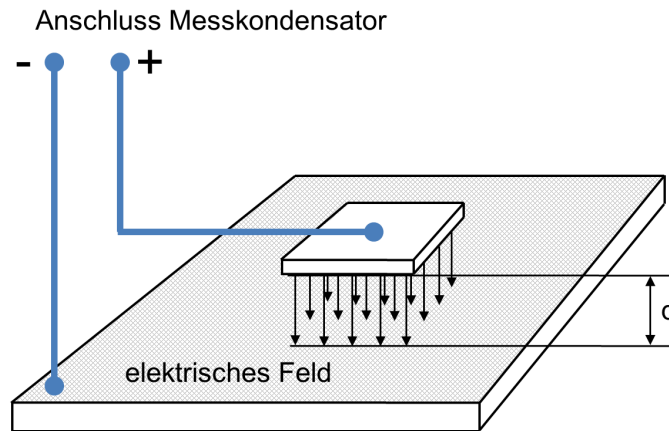


Abbildung 29: Prinzip der kapazitiven Messung

Der kapazitive Sensor besteht aus einer elektrisch isolierten, leitfähigen Platte definierter Größe, die zusammen mit dem Gegenkörper die zwei Platten eines Kondensators bilden. Das Dielektrikum stellt der zu vermessenden Fluidfilm dar. Der Gegenkörper muss demnach elektrisch leitfähig und kontaktierbar sein. Auch hier wird die gemessene Spaltdicke der Filmdicke gleichgesetzt und nur an einer Position bestimmt. Eine ungleichmäßige Füllung bzw. Verteilung des zu vermessenden Fluides resultiert in einem fehlerhaften Signal, das ohne weitere Information zur Spaltgeometrie nicht interpretierbar ist [83]. Zusätzlich darf der Gegenkörper die Sensorplatte nicht berühren, da ansonsten ein Kurzschlussstrom die Messung unmöglich macht.

Hamilton und Moore [85] gelingt es, mit in die Zylinderwand eingelassener kapazitiver Sensoren, den Abstand zwischen Kolbenring und Zylinderwand auf $0,4 - 2,5 \mu\text{m}$ zu bestimmen. Mattsson [86] setzt ebenfalls kapazitive Sensoren in der Zylinderwand ein und detektiert je nach Messposition und Kolbenring, Abstände von unter $3 - 10 \mu\text{m}$. Shin et al. [87] setzen verschiedene kapazitive Sensoren direkt im Kolbenring ein und sind so in der Lage, den Abstand zwischen Kolbenring und Zylinderwand über den gesamten Hub zu verfolgen. Im Zünd-OT geben sie einen Abstand von $1,5 - 2,5 \mu\text{m}$ an und vermuten Mangelschmierung. Furuhashi et al. [88] setzen ebenfalls kapazitive Sensoren in den Kolbenringen eines geschleppten Dieselmotors ein und vergleichen die gemessenen Ölfilmdicken mit der theoretischen zu erwartenden Ölfilmdicke. Für den obersten Kolbenring weisen sie so Mangelschmierung nach.

3.2.2 Fluoreszenzfreie optische Verfahren

Auch ohne den Einsatz von laserinduzierter Fluoreszenz bieten optische Verfahren sinnvolle Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung von Fluidfilmen.

Im einfachsten Fall erfolgt die Beobachtung des beleuchteten Schmierspalt mit einer Kamera ohne weitere Hilfsmittel. Die Grenze zwischen Schmiermittel und Umgebungsmedium ist so z.B. durch deren unterschiedlichen optischen Eigenschaften (Farbe, Brechungsindex) erkennbar.

Neben der Ermittlung der qualitativen Ölfilmverteilung ermöglicht die Auswertung von optischen Interferenzphänomenen eine hochgenaue Vermessung der Ölfilmdicke. Dafür ist jedoch eine Messgeometrie notwendig, die die Einsatzgebiete auf spezielle Tribometer beschränkt.

Methoden basierend auf Diskontinuität im Brechungsindex

Beim Übergang von Licht in ein Medium mit anderem Brechungsindex werden Lichtstrahlen gebrochen. Abbildung 30 zeigt die möglichen Strahlengänge.

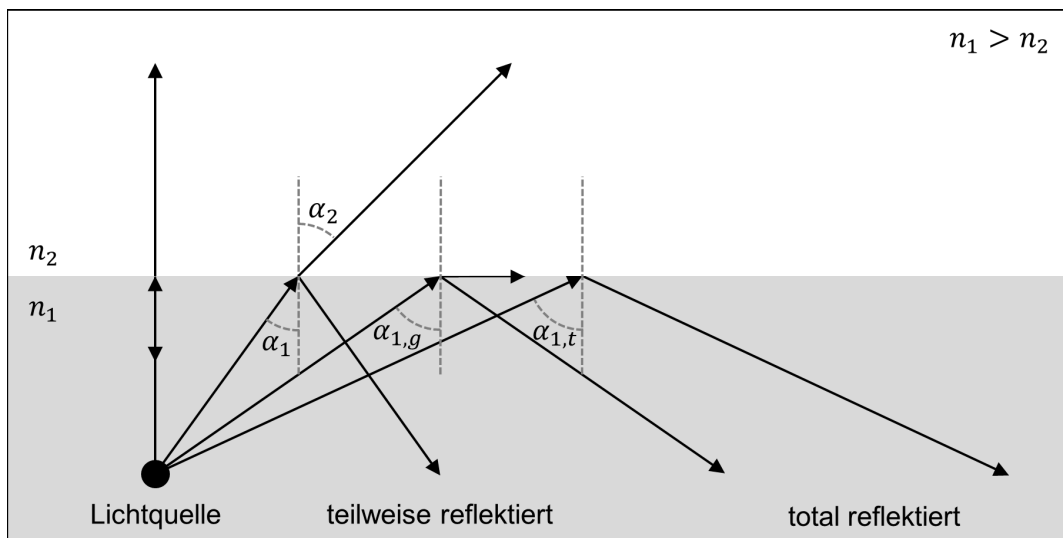


Abbildung 30: Brechungseigenschaften an optischen Grenzflächen

Ein einfallender Lichtstrahl wird an der Grenzfläche zwischen den zwei Medien unterschiedlicher Brechungsindices teilweise reflektiert und gebrochen. Während bei der Reflexion der Winkel des einfallenden Strahls α_1 mit dem Winkel des ausfallenden Strahls übereinstimmt, verändert sich der Winkel des gebrochenen Strahls α_2 . Dieser sogenannte Brechungswinkel ist eine Funktion der Brechungsindices n_1 und n_2 sowie des Einfallswinkels α_1 . Die Verhältnisse bei der Lichtbrechung beschreibt das Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (33)$$

- Mit α_1 : *Brechungswinkel* bis zur Mediengrenze
 α_2 : *Brechungswinkel* ab der Mediengrenze
 n_1 : *Brechungsindex* Medium 1
 n_2 : *Brechungsindex* Medium 2

Medien mit höheren Brechungsindices werden auch als „optisch dichter“ bezeichnet. Beim Übergang von Licht in ein Medium mit geringerer optischer Dichte (zum Beispiel beim Übergang Glas nach Luft) kommt es bei großen Einfallswinkeln α_1 zur sogenannten Totalreflexion. Das einfallende Licht kann in diesem Fall nicht in das optisch dünnere Medium eindringen und wird fast vollständig reflektiert.

Ist der Winkel α_1 des einfallenden Lichtstrahls kleiner als der Grenzwinkel α_{1g} , so wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche zwischen den beiden Medien gebrochen und verläuft unter dem Winkel α_2 weiter. Vergrößert sich der Einfallswinkel zu α_{1t} , wird der Lichtstrahl schließlich total reflektiert und kann das optisch dichtere Medium nicht verlassen. Beim Übergang der beiden Zustände verläuft der gebrochene Strahl entlang der Grenzfläche. Der dazu gehörige Grenzwinkel berechnet sich zu:

$$\sin(\alpha_{1g}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (34)$$

In Tabelle 2 sind die Brechungsindices einiger Stoffe aufgeführt.

Tabelle 2: Brechungsindices verschiedener Medien

Material	Brechungsindex
Luft	1
Wasser	1,33
Motoröl	1,45 – 1,55 [89]
Quarzglas	1,45 – 1,5 [90]
Saphir	etwa 1,7 [91]

Luft hat einen Brechungsindex von nahezu 1, während die Materialien der optischen Zugänge (Quarzglas und Saphir) deutlich höhere Brechungsindices aufweisen. Diese sind dem Brechungsindex von typischem Motorenöl sehr ähnlich. Diese Eigenschaften nutzt man bei der optischen Untersuchung von geschmierten Kontakten. Benetzt ein Ölfilm den optischen Zugang, findet am Übergang zwischen Fenster und Ölschicht im

Gegensatz zum unbenetzten Fenster kaum Brechung bzw. Totalreflexion statt. Dieser Unterschied ist deutlich sichtbar und kann zur Auswertung des Füllzustandes im Schmierpalt genutzt werden.

Wang et al. [92] setzen dieses Verfahren an einem Tribometer ein und untersuchen den Füllzustand von Nöpfchen mit 1 mm Durchmesser und unterschiedlicher Tiefe im Bereich von 50–100 μm auf der Oberfläche eines Probenkörpers. Eine Quarzglas-Scheibe, die sich über dem Probenkörper dreht, dient dabei als optischer Zugang, der mit Hilfe eines Kameramikroskops beobachtet werden kann. Die Unterscheidung zwischen benetzten und unbenetzten Bereichen wird laut Wang et al. durch das Vorhandensein von Interferenzerscheinungen (Newtonring) in den benetzten Bereichen erleichtert. Eine quantitative Auswertung dieser Ringe erfolgt nicht.

Cross et al. [93] untersuchen in einem ähnlichen Aufbau das tribologische Verhalten und den Füllstand einer ebenfalls mit Nöpfchen versehenen Anlaufscheibe eines Axialgleitlagers. Diese ist durch Verklebung einer gelochten Stahlfolie mit einer Quarzglas-Scheibe optisch zugänglich ausgeführt. Der mit einer Halogenlampe beleuchtete Ölfilm wird mit Hilfe einer DSLR-Kamera fotografiert.

Greene [62] setzt das Verfahren an einem optisch zugänglichen Motor ein. Der optische Zugang erfolgt durch einen ungekühlten Quarzglas-Zylinder, weshalb der Motor ausschließlich geschleppt betrieben wird. Für die Visualisierung der Ölverteilung im Bereich des Kolbens mittels einer Kinokamera verwendet Greene zwei Verfahren. Zum einen wird Licht derart in den Quarzzyylinder geleitet, dass es in dessen Inneren total reflektiert wird. Befindet sich Öl auf dem Quarzzyylinder, kann das Licht aufgrund der nahezu gleichen Brechungsindices aus dem Zylinder austreten und wird für die Kamera sichtbar. Ölbenetzte Stellen im Zylinder erscheinen somit heller als nicht benetzte Bereiche.

Ergänzend nutzt Greene die Fluoreszenz des Schmieröls, die er durch die Zugabe von geeigneten Substanzen verstärkt. Eine UV-Lichtquelle, die den Ölfilm direkt beleuchtet, regt das Schmieröl zur Fluoreszenz an und macht es somit sichtbar. Durch die indirekte Beleuchtung mittels Totalreflexion wird nur an der Quarzzyylinderwand anhaftendes Öl sichtbar, während mit dem Fluoreszenz-Verfahren auch Öl erscheint, das auf dem Kolben haftet und keinen Kontakt zur Zylinderwand hat.

Nakashima [94] verwendet mit „Oil Red“ (ein fettlöslicher roter Azofarbstoff) eingefärbtes Öl in einem optisch zugänglichen Motor, das er mit einer Videokamera detektiert. Um die Sichtbarkeit des Ölfilms zu verbessern, verzinkt er den Kolben. Für den optischen Zugang wird ein Quarzglaszylinder mit 5 mm Wandstärke in den aufgebohrten Block eines Vierzylindermotors geklebt. Nakashima verwendet die Messtechnik zur Untersuchungen der Dichtwirkung des obersten Kolbenrings in Abhängigkeit der Drosselklappenstellung im Schleppbetrieb. Hierbei stellt er bei der Verwendung einer speziellen Ringstoßgeometrie eine deutliche Reduzierung des Ölflusses in Richtung Brennraum fest.

Alle hier vorgestellten Anwendungen haben gemeinsam, dass sie nur eine Aussage über die flächige Ausbreitung des Ölfilms erlauben. Eine Aussage über die absolute Ölfilmdicke ist mit ihnen nicht möglich.

Interferenzbasierte Schichtdickenmessung

Interferenz an dünnen Schichten entsteht durch die Überlagerung von kohärenten Lichtwellen, die an den Grenzflächen der Schichten reflektiert werden. Dies ermöglicht durch die optische Auswertung der Interferenzeffekte eine hochgenaue Ermittlung von Schichtdicken im Bereich der Lichtwellenlänge. Um die Bedingungen für die Interferenz zu gewährleisten, ist eine spezielle Messgeometrie notwendig. Die Oberflächen, die den Fluidfilm begrenzen, müssen eine Rauigkeit unterhalb der Lichtwellenlänge aufweisen, um diffuse Streuung des einfallenden Lichts zu verhindern. Des Weiteren darf der Abstand zwischen den beiden Oberflächen aufgrund der begrenzten Kohärenzlänge des einfallenden Lichts nicht zu groß werden.

Besondere Bedeutung hat dieses Verfahren bei der Schmierfilm-Vermessung an sogenannten „Ball-on-Disk“ Tribometern erlangt. Hier wird eine Stahlkugel an die Unterseite einer rotierenden Scheibe gedrückt und es werden die auftretenden Reibkräfte untersucht. Der Messaufbau und das Messprinzip werden in Abbildung 31 erläutert.

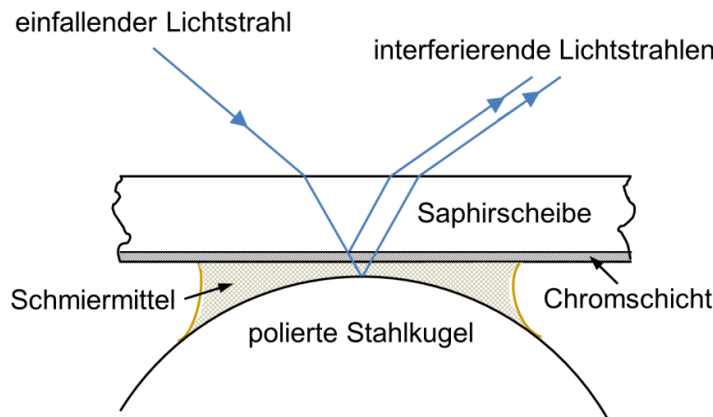


Abbildung 31: Prinzip der Interferenzmessung am „Ball-on-Disk“ Tribometer

Den optische Zugang und gleichzeitig den tribologischen Gegenkörper bildet eine polierte Saphirscheibe (vereinzelt kommt auch eine Quarzglasscheibe zum Einsatz). Der Reflexionsgrad der Grenzschicht zwischen Saphirscheibe und Schmiermittel wird durch eine halbdurchlässige Metallbeschichtungen (zumeist Chrom) erhöht. Fällt ein Lichtstrahl auf die beschichtete Saphirscheibe, wird ein Teil des Lichts an der Metallschicht reflektiert. Die übrige Strahlung gelangt weiter, bis sie ebenfalls von einer weiteren reflektierenden Oberfläche (polierte Stahlkugel) reflektiert wird. Die beiden reflektierten Lichtstrahlen interferieren miteinander. Dies hat bei der Betrachtung von oben die Ausbildung von Interferenzmustern (sog. Newtonringen) zur Folge, die im direkten Zusammenhang mit der Differenz der zurückgelegten Weglänge der beiden Lichtstrah-

len stehen und somit ein Maß für die zwischen Saphirscheibe und Stahlkugel befindliche Schmierfilmhöhe sind. Bei der Verwendung von Weißlicht entstehen farbige Interferenzeffekte, deren Farbfolge eine noch genauere Schichtdickenmessung erlaubt.

Gohar und Cameron [95] setzen diese Weißlicht-Interferenz-Messtechnik an einem Tribometer ein, um das elasto-hydrodynamische Schmierfilmverhalten im Schichtdickenbereich von $0,1 - 1 \mu\text{m}$ zu untersuchen. Die Auswertung der Ölfilmdicke erfolgt durch direktes Auszählen der Newton-Ringe. Luo et al. [96] automatisieren die Filmdickenmessung mittels Weißlicht durch die Verwendung einer CCD-Kamera und geben eine Schichtdicken-Auflösung von $0,5 \text{ nm}$ an. Sugimura et al. [59] nutzen ebenfalls eine CCD-Kamera zur Aufnahme der Interferenzbilder. Zudem vergleichen sie die Interferenz-Messtechnik mit einer Messtechnik, die auf induzierter Fluoreszenz basiert. Hierbei sehen sie Vorteile der Interferenz-Messtechnik bei der Erfassung sehr dünner Schichten im Nanometer-Bereich, zählen jedoch die hierfür notwendige halbtransparente Metallschicht als Nachteil des Verfahrens auf. Myant [60] gibt etwa $2 \mu\text{m}$ als maximal messbare Schichtdicke bei der Verwendung der Interferenz-Messtechnik an. Er nennt die limitierte Kohärenzlänge der verwendeten Weißlichtquellen als Grund dafür und verweist auf Fluoreszenz-Messtechnik als mögliche Alternative für die Vermessung dickerer Schichten.

Die interferenzbasierte Messung eignet sich durch die limitierte Messgeometrie vor allem zur Untersuchung der hydrodynamischen Schmierung an modellhaften Kontakten. Hier liefert sie sehr genaue Ergebnisse. Bei großen Schichtdicken oder nur teilweise gefüllten Schmierpalten sowie bei anwendungsbezogenen Bauteilgeometrien kann die interferenzbasierte Messung der Ölfilmdicke nicht angewendet werden.

4 Aufbau der optischen Messtechnik

Dieses Kapitel beschreibt die Auswahl der optischen Messtechnik für die Anwendung der Ölfilmdickenmessung in der Kolbengruppe. Die optische Messtechnik soll sowohl an einem Modelltribometer für Kolbenringe als auch an einem optisch zugänglichen Motor zum Einsatz kommen. Mit Hilfe einer Kalibriervorrichtung werden die wesentlichen optischen Eigenschaften des ausgewählten Messsystems untersucht.

4.1 Auswahl des optischen Systems

Dieser Abschnitt widmet sich der Auswahl der optischen Komponenten basierend auf bestehenden Systemen in der Literatur.

4.1.1 Öl/Farbstoff-Mischung und optisches Filter

Motorenöl, als Gemisch verschiedenster Kohlenwasserstoffe, weist abhängig von der Ölsorte und der Anregungswellenlänge eine natürliche Fluoreszenz auf [46]. Somit ist es prinzipiell möglich, auf Basis der Eigenfluoreszenz Schichtdickenmessungen zu unternehmen [54, 62, 63, 68, 69]. Bei der Bestrahlung mit Anregungslicht zeigt das unbehandelte Öl jedoch starke Bleichungseffekte. Ford und Foord [54] schlagen daher die Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen als Gegenmaßnahme vor, wodurch sich auch die Fluoreszenzintensität der betrachteten dünnen Ölschichten deutlich steigern lässt.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Fluoreszenzintensität ist die Temperatur des betrachteten Ölfilms [46, 64, 68, 73, 74]. Mit steigender Temperatur lässt sich meist eine Abnahme der Fluoreszenzintensität feststellen. Für eine quantitative Vermessung der Ölfilmdicke bei variierender Filmtemperatur gibt es verschiedene Lösungsmöglichkeiten [73]:

- Abschätzung der Ölfilmtemperatur

Unter bestimmten Umständen kann die Temperatur des zu vermessenden Ölfilms abgeschätzt werden, woraufhin die Kalibrierung der Messtechnik bei dieser Temperatur erfolgen kann. Dies trifft beispielsweise auf Versuche zu, bei denen die Öl- oder Bauteiltemperatur geregelt wird und der Wärmeeintrag in den Ölfilm vernachlässigbar klein ist.

- Bestimmung der Ölfilmtemperatur

Die Ölfilmtemperatur kann durch optische Verfahren bestimmt werden. Rowe et al. [97] messen die Temperaturverteilung an einem tribologischen Kontakt über die emittierte Infrarotstrahlung. Dies erfordert jedoch den Einsatz eines Infrarot-

transmittierenden optischen Zugangs (Calciumfluorit-Fenster) und spezieller Infrarot-Messtechnik. Eine weitere Möglichkeit der Temperaturmessung stellt die Verhältnismessung zweier Fluoreszenzwellenlängen dar. Diese als „dual emission LIF“ bezeichnet Technik basiert auf dem Emissionsverhalten von Fluoreszenzfarbstoffen, die ihre spektralen Emissionseigenschaften bei Temperaturvariationen verändern. So lässt

sich über das Verhältnis der Fluoreszenzintensitäten bei zwei Emissionswellenlängen die Filmtemperatur detektieren [78]. Aufgrund der Notwendigkeit, zwei Emissionswellenlängen zeitgleich zu untersuchen, ist auch bei diesem Lösungsansatz weitere Ausrüstung und zusätzlicher Kalibrieraufwand notwendig.

- Reduzierung der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenzintensität

Gelingt es, die Temperaturabhängigkeit der gemessenen Fluoreszenzintensität signifikant zu verringern, ist dies der einfachste Weg, genaue Filmdickenmessungen zu erhalten. Thirouard zeigt, dass dies durch Kombination zweier Fluoreszenzfarbstoffe erreicht werden kann [73].

Die Fluoreszenzeigenschaften von Fluoreszenzfarbstoffen in Lösung werden durch verschiedenste Einflussfaktoren bestimmt. Neben der Schichtdicke beeinflussen z.B. die Beschaffenheit des Lösungsmittels (pH-Wert, Viskosität, Temperatur) oder die Intensität des Anregungslichts die Fluoreszenzintensität bzw. deren Spektrum [51, 98]. Möchte man die Größe eines dieser Einflussfaktoren über die Auswertung der Fluoreszenzintensität in einem bestimmten Wellenlängenbereich bestimmen, so müssen weitere Einflussfaktoren entweder ausgeschlossen, oder deren Quantität bestimmen werden.

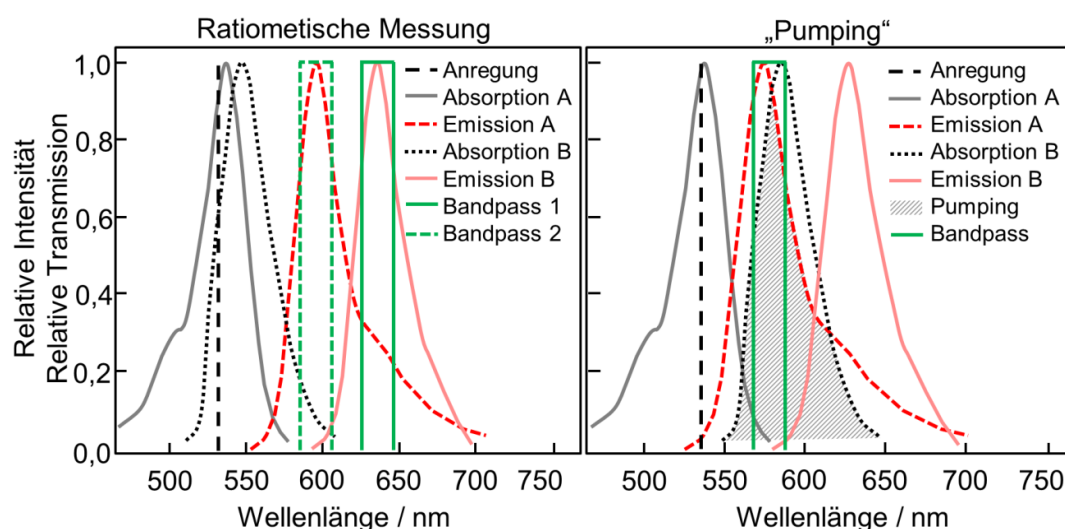


Abbildung 32: Interaktion zwischen zwei Fluoreszenzfarbstoffen A und B. Links: Die Verhältnismessung. Rechts: Der interne Energietransfer, der als „pumping“ bezeichnet wird.

Hierzu wurden in der Vergangenheit zwei verschiedene Lösungsansätze untersucht, deren prinzipielle Funktion sich am besten anhand von Spektren erklärt.

Zum einen bieten sich Messverfahren an, die durch die Auswertung zweier Emissionswellenlängen zusätzliche Informationen zum Zustand des fluoreszierenden Mediums liefern. Bei dieser Verhältnismessung (Abbildung 32 links) werden die Farbstoffe so gewählt, dass eine gemeinsame Anregung bei 532 nm möglich ist und die jeweilige Fluoreszenzintensität unterschiedlich auf die zu ermittelnde Messgröße (Temperatur, pH-Wert, etc.) reagiert. Die Emissionsmaxima der Farbstoffe bei etwa 590 nm (Emission A) und bei etwa 630 nm (Emission B) sind spektral unterscheidbar und können so separat erfasst und ausgewertet werden. Dazu wird das jeweilige Fluoreszenzsignal über zwei Bandpassfilter A und B aus dem Spektrum herausgefiltert und zwei separaten Kameras zugeführt. Das Verhältnis der Fluoreszenzintensitäten stellt die Messgröße dar. Dieses Verfahren wird von Coppeta [99] zur Messung des pH-Wertes einer wässrigen Lösung eingesetzt. Die Intensitätsverteilung des Anregungslichts wird durch eine Verhältnismessung korrigiert. Sanda et al. [100] verwenden Coumarin 6 und Rhodamin B zur gleichzeitigen Ermittlung von Ölfilmdicke und -temperatur in einem optisch zugänglichen Motor. Diese Anwendung verfolgen auch Hidrovo et al. [61, 101, 102]. Zusätzlich nutzen sie eine Verhältnismessung zur Kompensation von ungleichmäßiger Anregungslichtverteilung. Thirouard [73] versucht eine Verhältnismessung von Temperatur und Schichtdicke von Ölfilmen in einem optisch zugänglichen Motor mit nur einer Kamera zu erreichen. Dazu erfasst er das jeweilige Fluoreszenzsignal der beiden Farbstoffe nicht parallel, sondern sequentiell in einem möglichst stabilen Betriebspunkt. Er stellt fest, dass die Messgenauigkeit der Temperaturerfassung auf 20 °C begrenzt ist und zudem bei Temperaturen über 110 °C bzw. Schichtdicken >50 µm versagt. Er gibt unerwünschte Interaktionen zwischen beiden Farbstoffen sowie eine unzureichende Wiederholbarkeit des Experiments als Gründe für diese Limitationen an.

Ein zweiter Lösungsansatz basiert auf der Interaktion zweier Fluoreszenzfarbstoffe und ist auf der rechten Seite von Abbildung 32 basierend auf den Überlegungen von Thirouard dargestellt, der auch diese Möglichkeit zur Reduzierung der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenzintensität in einem bestimmten spektralen Bereich untersucht [73]. Die parallele, oder wie in diesem Fall sequentielle, Erfassung von zwei Emissionswellenlängen entfällt dadurch. Da die Absorptions- und Emissionsspektren von Fluoreszenzfarbstoffen mit großem Molekulargewicht Bandspektren sind, überdecken sich diese unter Umständen zum Teil, wenn sich zwei oder mehr Farbstoffe in einer Lösung befinden. Es kann daher zu einem Energietransfer kommen, der das Emissionsverhalten der Lösung verändert. Dieser Vorgang wird als „Pumping“ bezeichnet. Die Anordnung der Emissions- und Absorptionsspektren der beiden Farbstoffe ist so gewählt, dass es zu einer Reabsorption der Fluoreszenz von Farbstoff A durch den Farbstoff B kommt: Farbstoff A kann bei 532 nm zur Fluoreszenz angeregt werden. Die Emission A bei etwa 570 nm deckt sich zum Teil mit dem Absorptionsspektrum von Farbstoff B. Daher wird ein Teil des Fluoreszenzlichts nicht emittiert, sondern vom Farbstoff B ab-

sorbiert und rotverschoben bei etwa 640 nm teilweise wieder abgegeben. Farbstoff A pumpt somit den Farbstoff B. Der Anteil des reabsorbierten Lichts ist Einflussfaktoren wie beispielsweise der Temperatur unterworfen. Thirouard wählt Pyrromethen 567 als Farbstoff A, da dieser im Rahmen seiner Untersuchung die geringste Temperaturabhängigkeit zeigt. Zur Abtrennung des Fluoreszenzlichts wählt er ein schmalbandiges Bandpassfilter bei 570 nm mit einer Halbwertsbreite von 10 nm (spektrale Breite zwischen Punkten mit 50% der maximalen Transmissivität). Um die Temperaturabhängigkeit der detektierbaren Fluoreszenz innerhalb dieses spektralen Abschnitts weiter zu verringern, fügt er der Öl/Farbstoff Mischung Rhodamin 640 als Farbstoff B zu. Dieser ist in der Lage, einen Teil des Fluoreszenzlichts von Pyrromethen 567 zu absorbieren (Pyrromethen 567 pumpt Rhodamin 640). Thirouard zeigt, dass mit steigender Temperatur sowohl der Absorptionskoeffizient, als auch die Quantenausbeute der beiden Farbstoffe Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 abnehmen. Jedoch nimmt die Quantenausbeute von Pyrromethen 567, dessen Emission detektiert wird, weniger stark ab, als der Absorptionskoeffizient von Rhodamin 640. Dies führt dazu, dass der Anteil des durch Pumpeffekte verlorenen detektierbaren Lichtes mit steigender Temperatur stetig abnimmt. Dies kompensiert zum Teil die Verluste durch die sinkende Quantenausbeute. Für die Konzentration der Farbstoffe in Motoröl wählt er jeweils $1,0 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$. Um die Farbstoffe in Lösung zu bringen, verwendet Thirouard 1% Dichlormethan als Lösungsvermittler, das bei der betriebsbedingten Erwärmung des Öls wieder ausdampft. Bei der Überprüfung des Erfolgs der Farbstoffoptimierung stellt Thirouard bei der Erwärmung von Raumtemperatur auf 100°C nahezu keine Temperaturabhängigkeit der detektierten Fluoreszenz fest. Bei der weiteren Erwärmung auf 150°C sinkt die Fluoreszenzintensität um 15%, bei der Erwärmung auf 170°C um 30% im Vergleich zu 100°C Öltemperatur. Diese von Thirouard gefundene Farbstoffkombination aus Pyrromethen 567 und Rhodamin 640 wird aufgrund ihrer günstigen optischen Eigenschaften im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

4.1.2 Optische Komponenten

Nach der Auswahl der Farbstoffe können die Komponenten des optischen Systems darauf abgestimmt werden.

Laser

Als Anregungslichtquelle für das optische Messsystem wird ein blitzlampengepumpter, frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit 532 nm Emissionswellenlänge eingesetzt, der 100 mJ pro Puls bereitstellen kann (Litron LPY704-100PIV). Der hier eingesetzte Laser besteht aus zwei identischen Kavitäten zur Erzeugung von Doppelpulsen. Eine möglichst konstante Pulsenergie wird durch Ansteuerung der Blitzlampen im Bereich 70 – 100 Hz erreicht, geringere Repetitionsraten sind jedoch ebenfalls möglich. Abweichungen in der Pulsenergie werden durch einen Energiemonitor erfasst. Dafür wird ein kleiner Teil der Pulsenergie auf eine Photodiode geleitet, deren Signal während der

Messdatenauswertung als Vergleichsmaßstab zur Korrektur der Puls-zu-Puls-Abweichung dient. Die Pulslänge beträgt etwa 10 ns. Somit ergibt sich eine Pulsspitzenleistung von 10 MW. Der Strahl hat einen Durchmesser von 6,5 mm und zeigt eine etwa gaußförmige Intensitätsverteilung. Die genaue Beschaffenheit des Strahlprofils wird im Rahmen der Untersuchungen zur Flachfeldkorrektur beschrieben. Alternativ können die beiden Kavitäten auch zur Steigerung der Repetitionsrate auf 200 Hz verwendet werden. Dazu wird ein gleichmäßiger Versatz der Laserpulse gewählt. Dies hat jedoch den Nachteil, dass die laserabhängige Intensitätsverteilung entsprechend alterniert. Die Steigerung der Repetitionsrate über 100 Hz war im Rahmen der Arbeit nicht erforderlich. Eine Verdopplung der Pulsenergie durch Überlagerung der beiden Laserpulse ist nicht möglich, da beide Kavitäten denselben Verdoppler-Kristall verwenden und dieser nicht für diese Spitzenbelastung ausgelegt ist.

Zur Leistungsvariation des Lasers kann die Effizienz des Verdopplungsprozesses über einen einstellbaren Abschwächer variiert werden. Den Verlauf der Pulsenergie des Lasers in Abhängigkeit der Abschwächerstellung (engl. Attenuator) zeigt Abbildung 33. Die angegebenen Werte für die Pulsenergie basieren auf den Werten des Energiemonitors. Es zeigt sich, dass die Skala des Abschwächers nicht mit der tatsächlich abgegebenen Pulsenergie übereinstimmt. Im Bereich von 0 bis 18% Abschwächerstellung sinkt die abgegebene Pulsenergie sogar.

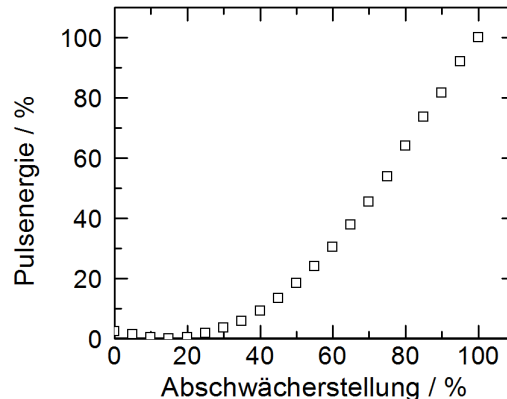


Abbildung 33: Laser-Pulsenergie in Abhängigkeit der Abschwächerstellung

Kamera

Zur Detektion des Fluoreszenzlichts kommt eine CMOS-Kamera zum Einsatz (PCO edge 5.5). Diese verfügt über eine Auflösung von 2560×2160 Pixel bei einer Pixelgröße von 6,5×6,5 μm^2 und erlaubt die Aufnahme von bis zu 50 Bildern pro Sekunde bei voller Auflösung. Zusätzlich können zwei Bilder in einem kurzen zeitlichen Abstand von minimal 120 ns ausgelöst werden. Gegenüber der von Thirouard [73] eingesetzten bildverstärkten CCD-Kamera mit einer Auflösung von 512×512 Pixel verspricht die CMOS-Kamera eine gesteigerte Bildqualität. Der Entfall der Bildverstärkung wird durch

ein sehr geringes Ausleserauschen der CMOS-Kamera und der gesteigerten Laser-Pulsenergie in Bezug auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis kompensiert. Der A/D-Wandler der CMOS-Kamera arbeitet mit 16 bit Auflösung. Ein weiterer Vorteil der CMOS-Technik ist die Unempfindlichkeit gegenüber dem sogenannten „blooming“. Dies tritt auf, wenn sehr helle Bildbereiche zu einem Überlauf der Ladungsmenge eines Pixels führen und so benachbarte Pixel beeinträchtigen. Die verwendeten Kamera-Objektive wurden gemäß den speziellen Anforderungen der zwei Versuchsträger (Tribometer und Einzylindermotor) ausgewählt.

Filter

Das optische Filter hat die Aufgabe nur einen ausgewählten Spektralbereich dem Detektor zuzuführen. Außerdem soll es gestreutes bzw. reflektiertes Anregungslicht vom Detektor fern halten. Thirouard verwendet ein Bandpassfilter mit 570 nm zentraler Wellenlänge und einer Halbwertsbreite von 10 nm. Aufgrund besserer Verfügbarkeit wurde dieses Filter durch ein Bandpassfilter mit 572 nm zentraler Wellenlänge und 15 nm Halbwertsbreite ($572 \pm 7,5$ nm) ersetzt. Das Bandpassfilter hat einen Durchmesser von 50 mm und wird vor dem jeweiligen Kameraobjektiv angebracht.

Timing und Signalverarbeitung

Das Timing der optischen Komponenten zur Bildaufnahme übernimmt ein Steuerrechner der Firma LaVision mit Hilfe einer sogenannten „programmierbaren Timing-Unit“ (PTU) und der Software DaVis 8. Diese löst anhand der Positionsdaten, die über den Drehwinkelgeber des jeweiligen Versuchsträgers ermittelt werden, den Laserpuls sowie die Kameraaufnahme aus. Die optische Messtechnik erlaubt die Aufnahme von einem Bild pro Tribometer- bzw. Motorzyklus und ist somit phasengekoppelt. Diese Eigenschaft soll im Folgenden zur Charakterisierung der Messtechnik herangezogen werden.

4.2 Voruntersuchungen mit Hilfe der Kalibriervorrichtung

Um die Eigenschaften des optischen Systems auch ohne Versuchsträger testen zu können, wurde eine Kalibriervorrichtung entwickelt, in der eine definierte Filmdicke erzeugt und untersucht werden kann. Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau der Kalibriervorrichtung und stellt die damit durchgeführten Vorabuntersuchungen vor.

4.2.1 Der Aufbau der Kalibriervorrichtung

Die Kalibriervorrichtung ermöglicht die Untersuchung der optischen Eigenschaften der verwendeten Farbstoffmischungen unabhängig vom später eingesetzten Versuchsträger. Die Kalibriervorrichtung besteht aus einem rotationssymmetrischen Aluminiumzylinder, der mit einem Quarzglasfenster versehen ist. Zwischen dem Quarzglasfenster und einem austauschbaren Gegenkörper wird mittels zweier halbkreisförmiger Präzisionsfolien ein Spalt mit definierter Höhe erzeugt, der mit der zu vermessenden Flüssigkeit gefüllt werden kann. Abbildung 34 zeigt den Aufbau der Kalibriervorrichtung anhand einer Schnittzeichnung.

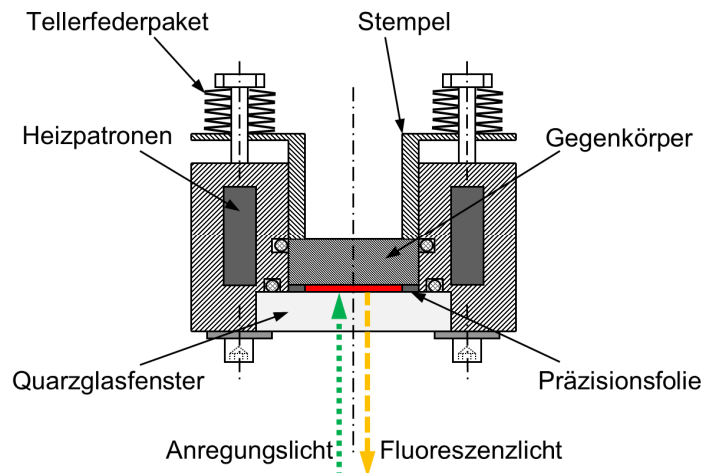


Abbildung 34: Schnittzeichnung Kalibriervorrichtung

Um den Einfluss der Temperatur auf die Fluoreszenz zu ermitteln, kann die Kalibriervorrichtung mittels Heizpatronen (drei Stück mit jeweils 200 W) beheizt werden. Die Temperatur wird über eine Bohrung, die einen Temperaturfühler aufnimmt ermittelt und einem Regelkreis zugeführt. Der Aluminiumkorpus ermöglicht eine rasche und gleichmäßige Temperaturverteilung über die Kalibriervorrichtung. Um Wärmedehnungen auszugleichen und ein Verrutschen der Präzisionsfolien zu verhindern, wird der jeweilige Gegenkörper über einen federbelasteten Stempel auf das Quarzglasfenster mit den zwei Präzisionsfolien gepresst. Temperaturbeständige Dichtringe verhindern den Austritt der Testflüssigkeit während der Messung.

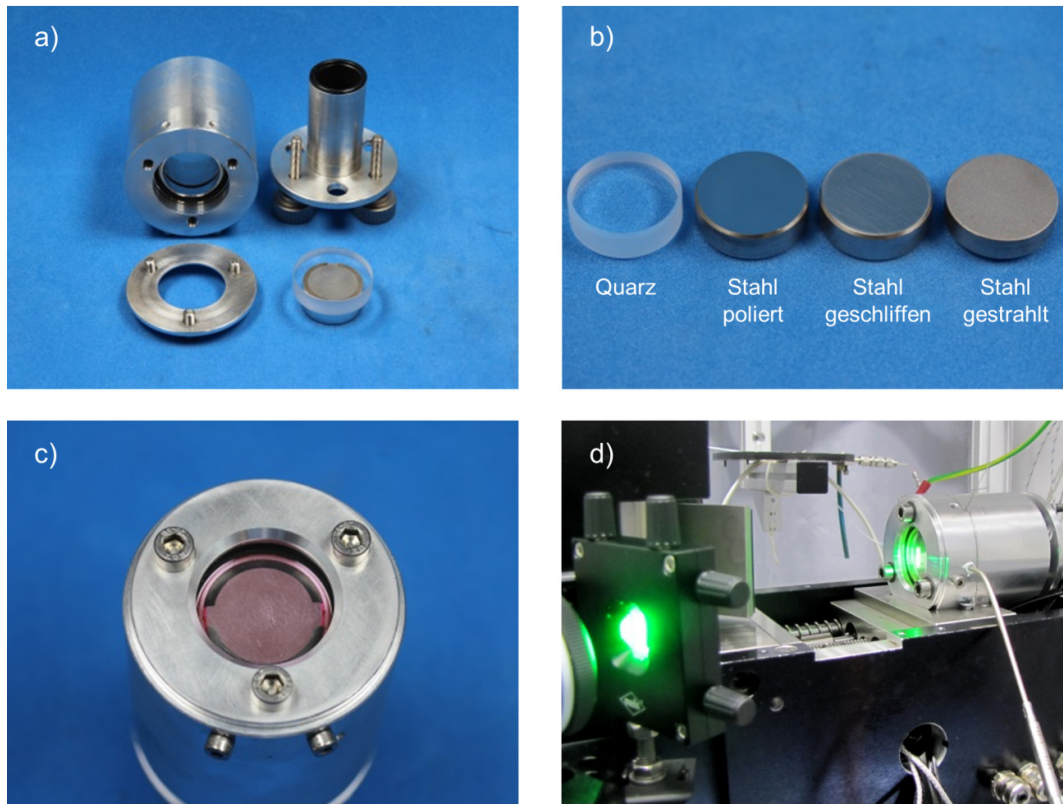


Abbildung 35: Details Kalibriervorrichtung: (a) Einzelteilansicht der demontierten Kalibriervorrichtung, (b) Verschiedene Gegenkörper, (c) Blick auf die eingefärbte Ölschicht, (d) Einsatz der Kalibriervorrichtung im Strahlengang des RRV-Kolbenringtribometers

Abbildung 35 gibt einen detaillierten Überblick über den Aufbau der Kalibriervorrichtung. Das Teilbild (a) zeigt die Einzelteile der Kalibriervorrichtung von links oben im Uhrzeigersinn: Aluminiumzylinder, der das Fenster, sowie die Gegenkörper aufnimmt. Druckstempel, der die Grundkörper mittels Federkraft auf das Quarzglasfenster drückt. Gegenkörper und Quarzglasfenster mit zwei halbkreisförmigen Abstandshalter-Folien. Klemmring für das Quarzglasfenster. Teilbild (b) zeigt verschiedene Gegenkörper, auf deren Beschaffenheit später im Detail eingegangen wird. Hidrovo and Hard [61] erwähnen den Einfluss des Reflexionsgrades der Trägerschicht auf das Fluoreszenzverhalten einer sich darauf befindlichen fluoreszierenden Lösung. Dies kann mit der Kalibriervorrichtung durch den Einsatz verschiedener Gegenkörpermaterialien sowie verschiedener Oberflächenbeschaffenheiten untersucht werden. Neben einem Gegenkörper aus Quarzglas, der einen geringen Reflexionsgrad aufweist, sind Gegenkörper aus Stahl mit drei unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten (poliert, geschliffen, sandgestrahlt) abgebildet. Teilbild (c) zeigt die zusammengesetzte Kalibriervorrichtung mit einem fluoreszenzmarkierten Ölfilm definierter Dicke. In Teilbild (d) wird der Einsatz der Kalibriervorrichtung im Strahlengang des RRV-Kolbenringtribometers gezeigt. Dafür wird die Probenhalterung komplett entfernt und stattdessen die Kalibriervorrichtung in das Tribometer eingesetzt. Auf Höhe des Fensters sieht man den Sensor für die Erfas-

sung und Regelung der Kalibriervorrichtungstemperatur. Neben den Gegenkörpern aus Stahl sind zusätzliche Gegenkörper aus Aluminium hergestellt worden. Auch diese wurden mit jeweils drei verschiedenen Oberflächenrauigkeiten (poliert, geschliffen, sandgestrahlt) versehen.

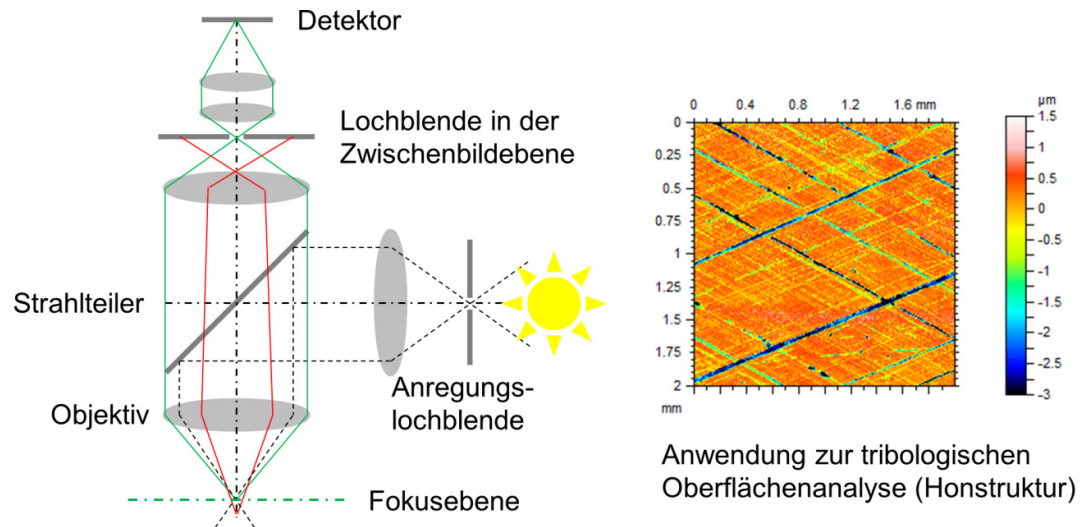


Abbildung 36: Funktionsprinzip der Konfokalmikroskopie mit Beispielbild

Die unterschiedliche Oberflächenstruktur wurde mit einem Konfokalmikroskop untersucht. Dessen Funktionsprinzip ist in Abbildung 36 dargestellt.

Eine punktförmige Lichtquelle wird auf die Oberfläche des Präparats abgebildet. Ein Strahlteiler dient dabei zur Einkopplung des Lichts in den Strahlengang eines Mikroskops. Dieses wird gleichzeitig dazu verwendet, Licht durch das Objektiv auf eine Lochblende zu fokussieren, bevor es den Detektor erreicht. Die Blendenebene und der Beleuchtungspunkt im Präparat sind dabei konfokal zueinander. Bedingt durch die Blende wird nur der Bildpunkt im Fokus auf dem Detektor abgebildet. Durch Variation der Fokusebene und der Lochblendenposition kann die Oberfläche des Präparats inklusiv der Höheninformation abgetastet werden. Rechts im Bild ist beispielhaft die Oberflächenaufnahme eines $2 \times 2 \text{ mm}^2$ großen Bereichs einer gehonten Zylinderlaufbahn abgebildet. Gut zu erkennen ist die plateauartige Lauffläche mit den kreuzförmig geschliffenen Riefen. Abbildung 37 zeigt die mit Hilfe eines Konfokalmikroskops erzeugten Analysen der verschiedenen Gegenkörperoberflächen. Die erste Spalte stellt die Oberflächenaufnahme eines $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ großen Oberflächenausschnitts dar. Jeweils rechts daneben findet sich der Oberflächenschrieb, der bei den geschliffenen Oberflächen im 90° Winkel zu den Schleifriefen verläuft. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse. Die sandgestrahlten Oberflächen weisen Strukturhöhen im Bereich von 10 µm auf, die geschliffenen Oberflächen von etwa 1 µm . Die polierten Flächen zeichnen sich durch Rauigkeiten deutlich unter $0,1 \text{ µm}$ aus. Im Vergleich zu den Stahloberflächen sind die Strukturhöhen der Aluminiumoberflächen, bedingt durch die geringere Härte, ausgeprägter.

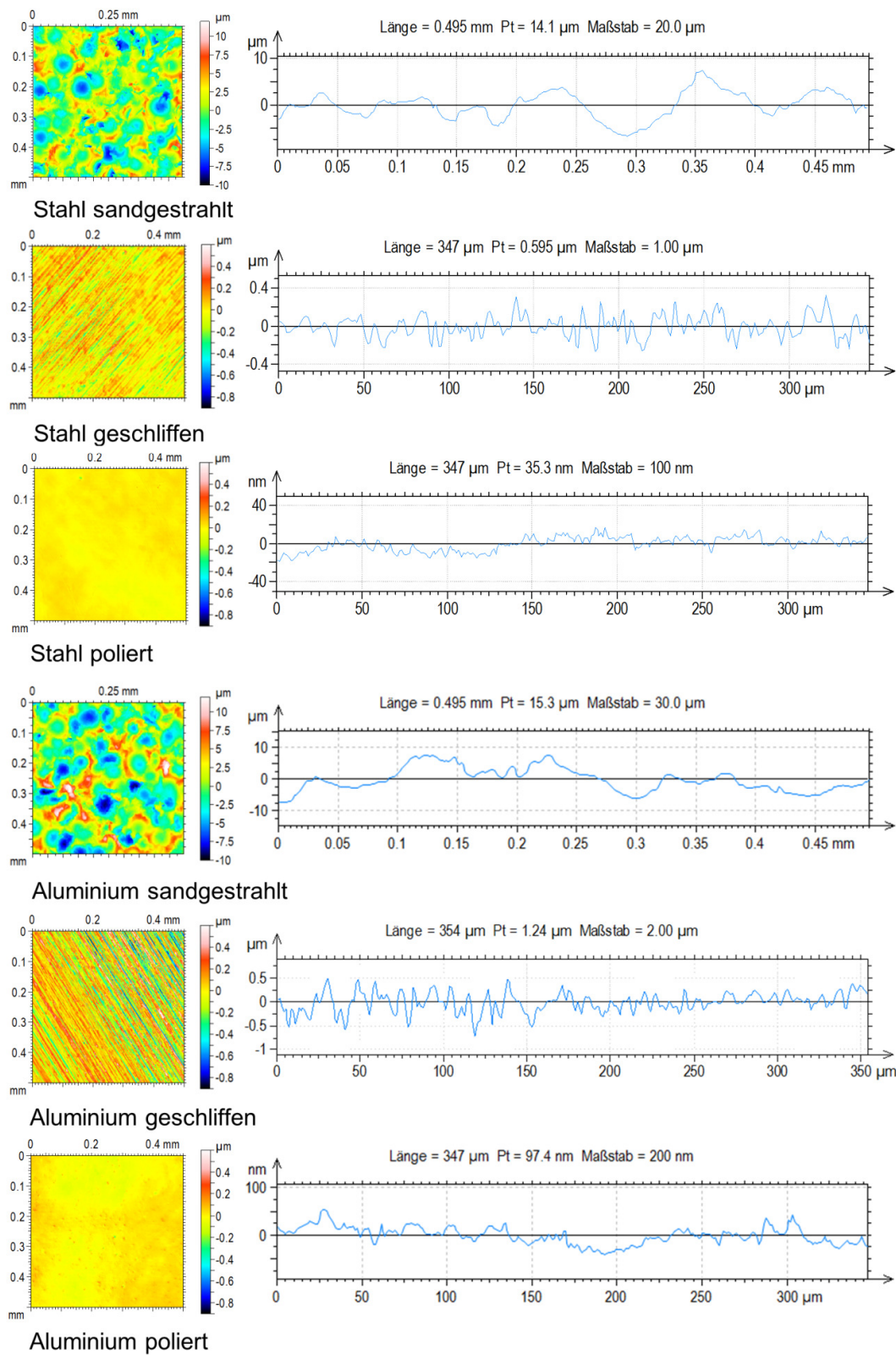


Abbildung 37: Oberflächenanalysen der Kalibriervorrichtungs-Gegenkörper durch Konfokalmikroskopie

4.2.2 Spektrale Eigenschaften der Öl/Farbstoff-Mischung

Zu Beginn der Untersuchungen wurde die Mischung der beiden Farbstoffe Pyrromethen 567 und Rhodamin 640 in Versuchsöl A im Spektrometer untersucht. Motoröl ist ein sehr ungewöhnliches Lösungsmittel für diese Farbstoffe, die üblicherweise in Farbstofflasern eingesetzt werden. Beide Farbstoffe sind für die Anregung bei 532 nm geeignet. Die Emissionswellenlängen bei Verwendung als Laserfarbstoff gelöst in verschiedenen organischen Lösemitteln wie Ethanol bzw. Methanol sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Emissionsbereiche der Laserfarbstoffe laut Datenblatt [103, 104]

Farbstoff	Emissionwellenlänge
Pyrromethen 567	537 – 615 nm
Rhodamin 640	589 – 710 nm

Die Farbstoffmischung wurde mit einer Konzentration von jeweils 0,1 mmol/l pro Farbstoff hergestellt. Die Einbringung der Farbstoffe in das Versuchsöl A erfolgt über den Lösungsvermittler Dichlormethan, der in einer Konzentration von 1% bezogen auf die gesamte Ölmenge eingesetzt wird. Eine 24-stündige Erwärmung auf 80 °C sorgt dafür, dass das Lösungsmittel wieder weitestgehend aus dem Öl verdampft. Mit Hilfe der in einem Spektrometer eingebauten Kalibriervorrichtung, wurde das Emissionsspektrum der Farbstoffmischung bei der Anregung mit 532 nm aufgenommen (Abbildung 38).

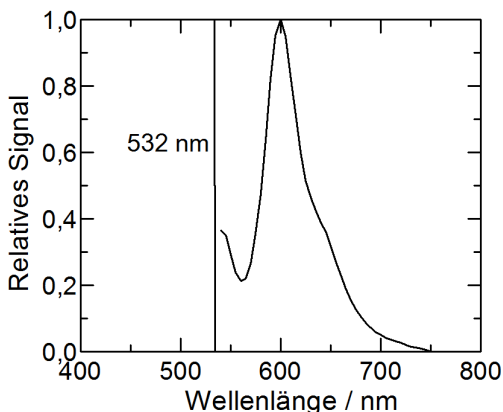


Abbildung 38: Emissionsspektrum der Farbstoffmischung, Anregung bei 532 nm

Deutlich zu erkennen ist das Emissionsspektrum von Rhodamin 640 mit der maximalen Intensität bei etwa 600 nm. Die Fluoreszenz von Pyrromethen 567 beginnt direkt oberhalb der Anregungswellenlänge von 532 nm. Im Bereich von 560 nm überlappen die Emissionsspektren der beiden Farbstoffe. Die Intensität der Pyrromethen 567 Fluoreszenz ist bei gleicher Farbstoffkonzentration deutlich geringer als die von Rhodamin

640. Dies deutet darauf hin, dass ein Teil der Ersteren, wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, vom Rhodamin 640 reabsorbiert wird. Dies entspricht den theoretischen Erwartungen zur Funktion der Temperaturkompensation.

4.2.3 Auswahl der Farbstoffkonzentration

Zu Beginn der Messungen wurde mit Hilfe eines Vorversuchs in der Kalibriervorrichtung das Signalniveau mit der von Thirouard benutzten Farbstoffkonzentration von 0,1 mmol/l je Farbstoff bestimmt. Die Bestrahlungsstärke lag bei diesen Versuchen bei etwa 0,3 mJ/mm². Um den Einfluss von Reflexionen am Gegenkörper gering zu halten, wurde ein Gegenkörper aus Quarzglas verwendet. Abbildung 39 zeigt, dass sich das Signal linear zur Schichtdicke verhält und bei einer Schichtdicke von etwa 30 µm die Sättigungsgrenze der Kamera erreicht. Um den Einfluss der Farbstoffkonzentration auf den Signalverlauf zu untersuchen, wurde das fluoreszenzmarkierte Öl mit n-Dodecan auf eine Farbstoffkonzentration von 0,02 mmol/l je Farbstoff verdünnt. Das Signal steigt nun weniger stark an. Selbst bei Schichtdicken von 100 µm erreicht es nicht die Sättigungsgrenze. Die Variation der Farbstoffkonzentration erscheint somit geeignet, um den Messbereich in der Schichtdicke zu erweitern. In einem weiteren Versuch wurde der Gegenkörper aus Quarzglas durch einen Gegenkörper aus Aluminium ersetzt. Hierbei bestätigte sich die von Hidrovo und Hart [61] vorhergesagte Abhängigkeit des Fluoreszenzverhaltens vom Reflexionsgrad des optischen Hintergrunds. Im Vergleich zur Messung mit dem Quarzglas-Gegenkörper verdoppelt sich das Signal in etwa.

Der lineare Zusammenhang zwischen Fluoreszenzsignal und Schichtdicke gilt nach dem Lambert-Beer'sche Gesetz nur bei geringen Filmdicken und kleiner Farbstoffkonzentration, vergleiche Abschnitt 3.1.1. Um die Grenzen des linearen Signalanstiegs zu bestimmen, wurden verschieden dicke Schichten bis zu 100 µm mit Farbstoffkonzentrationen von 0,05-0,2 mmol/l je Farbstoff in der Kalibriervorrichtung untersucht (Abbildung 40).

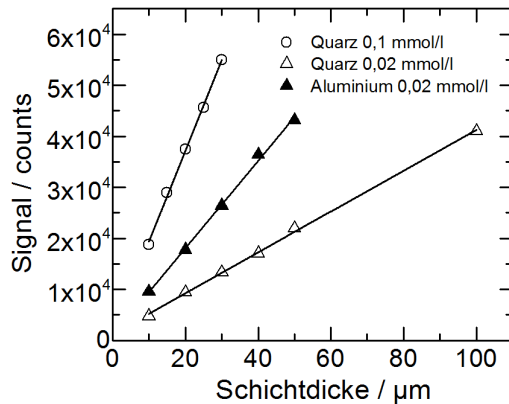


Abbildung 39: Signalstärke in Abhängigkeit der Farbstoffkonzentration und Hintergrundreflektivität bei 0,3 mJ/mm² Beleuchtungsstärke

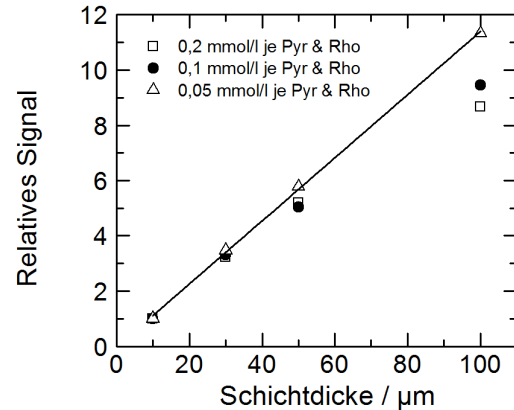


Abbildung 40: Linearität der Signalstärke zur Schichtdicke in Abhängigkeit der Farbstoffkonzentration

Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Signale der einzelnen Versuchsreihen auf einen Wert von 1 bei einer Schichtdicke von 10 µm normiert. Die Versuchsreihe mit einer Farbstoffkonzentration von jeweils 0,05 mmol/l wurde zur Verdeutlichung einer linearen Signalverlaufs mit einer linearen Regression versehen. Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz ist das Produkt aus Schichtdicke d und Farbstoffkonzentration c bestimmend für das Absorptionsverhalten und damit indirekt auch für die Fluoreszenz. Abbildung 40 zeigt, dass bei einem Wert von etwa $c \cdot d = 5 \frac{\mu\text{m} \cdot \text{mmol}}{\text{L}}$ die Abweichung vom linearen Signalverlauf etwa 10% erreicht. Mit dem Produkt aus Filmdicke und Konzentration kann nun der Messbereich des optischen Systems an die Messaufgabe angepasst und dabei ein möglichst hohes Signalniveau erreicht werden.

4.2.4 Untersuchungen zur Laser-Pulsenergie

Zur Untersuchung der Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit von der Laser-Pulsenergie wurde in der Kalibriervorrichtung eine 20 µm dicke Ölschicht erzeugt und das Fluoreszenzsignal bei verschiedenen Laserpulsenergien ausgewertet. Die Variation der Pulsenergie erfolgt dabei durch Veränderung der Effizienz des Verdoppler-Kristalls durch den Abschwächer. Die maximale Bestrahlungsstärke bei 100% Pulsenergie beträgt bei den Messungen etwa 0,3 mJ/mm² im ausgewerteten Bereich.

Abbildung 41 zeigt das Ergebnis der kleinschrittigen Erhöhung der Laserpulsenergie. Dabei wurde eine Farbstoffkonzentration von jeweils 0,1 mmol/l Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 in Versuchsöl A verwendet. Zur Untersuchung des Hintergrundeinflusses wurde der Versuch mit Gegenkörpern aus Quarzglas und Stahl durchgeführt.

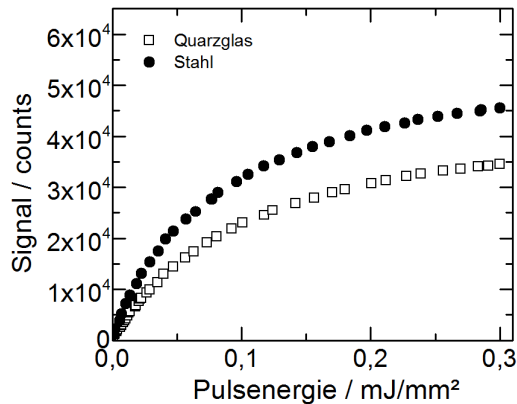


Abbildung 41: Abhängigkeit der Signalstärke von der Laser-Pulsenergie.

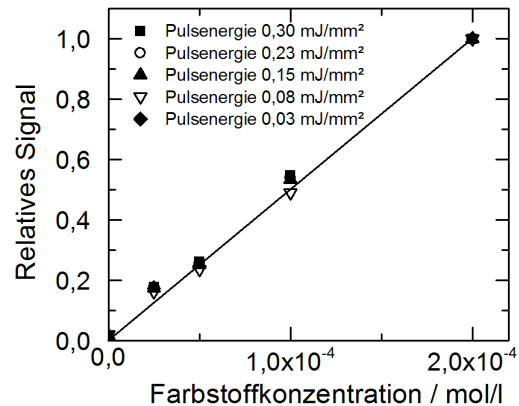


Abbildung 42: Abhängigkeit der Signalstärke von der Farbstoffkonzentration unter Variation der Laser-Pulsenergie.

Bei geringer Pulsenergie steigt das Signal nahezu linear an, ab etwa 10% der maximalen Pulsenergie zeigen sich jedoch deutliche Sättigungseffekte. Eine zehnfach höhere Pulsenergie ($0,3 \text{ mJ/mm}^2$ im Vergleich zu $0,03 \text{ mJ/mm}^2$) resultiert in einem nur etwa dreifach höheren Signal. Dieses Sättigungsverhalten hat Auswirkungen auf den Kalibrierprozess der Messtechnik und wird im Laufe der Arbeit zu berücksichtigen sein. Die Signalstärke bei der Verwendung eines geschliffenen Stahl-Gegenkörpers ist aufgrund der Reflexion von Anregungs- und Fluoreszenzlicht an der Gegenkörper-Oberfläche höher im Vergleich zu einem Quarzglas-Gegenkörper. Die Abhängigkeit des Fluoreszenzsignals vom Reflexionsgrad des Hintergrundes wirkt sich auf quantitative Messung der Schichtdicke und die Kalibrierung der Messtechnik aus. Daher findet sich im Rahmen der Arbeit eine detaillierte Untersuchung des Einflusses des Hintergrundmaterials.

Der Einfluss der Farbstoffkonzentration auf das Verhalten des Signals bei verschiedenen Laser-Pulsenergien ist in Abbildung 42 dargestellt. Eine $20 \text{ }\mu\text{m}$ dicke Ölschicht mit verschiedenen Farbstoffkonzentrationen von jeweils bis zu $0,2 \text{ mmol/l}$ wurden mit unterschiedlicher Lichtintensität unter Verwendung eines Stahlgegenkörpers bestrahlt. Das Signal bei $0,3 \text{ mJ/mm}^2$ Pulsenergie wurde zur besseren Vergleichbarkeit jeweils auf einen Wert von 1 skaliert. Die Fluoreszenzintensität steigt unabhängig von der Laserpulsenergie linear mit der Farbstoffkonzentration. Die gewonnenen Ergebnisse sind somit auf Systeme mit geringerer Bestrahlungsstärke übertragbar.

4.2.5 Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz

Bei der Messung der Ölverteilung in der Kolbengruppe, die große Temperaturgradienten aufweist, ist die Abhängigkeit der Fluoreszenz von der Temperatur der Farbstofflösung von entscheidender Bedeutung. Die Effektivität des gewählten Lösungsansatzes zur Reduzierung der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenzintensität wurde mit einem Versuch überprüft. Dazu wurde ein $20 \text{ }\mu\text{m}$ dicker Ölfilm unter Verwendung eines

Stahlgegenkörpers sowohl mit beiden Farbstoffen gemeinsam, als auch mit nur jeweils einem Fluoreszenzfarbstoff in der Kalibriervorrichtung erwärmt und das Fluoreszenzsignal mit dem optischen Messsystem unter Verwendung des Bandpassfilters bei $572 \pm 7,5$ nm untersucht. Der prinzipielle spektrale Aufbau des optischen Systems aus den zwei Fluoreszenzfarbstoffen und dem verwendeten Bandpassfilter ist in Abbildung 43 nochmals dargestellt. Ziel der Messung ist, den positiven Effekt der Reabsorption auf das Temperaturverhalten der Farbstoffmischung nachzuweisen.

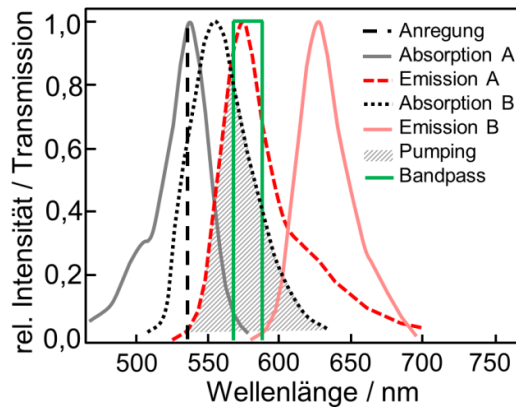


Abbildung 43: Reabsorption bei der Verwendung einer Farbstoffmischung nach Thirouard [73]

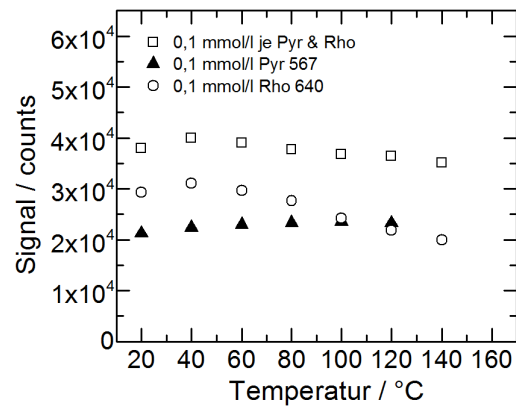


Abbildung 44: Temperaturabhängigkeit der Signalstärke von verschiedenen Farbstoffmischungen am phasengekoppelten System

Die Ergebnisse der temperaturabhängigen Fluoreszenzmessung zeigt Abbildung 44. Eine Mischung aus Motoröl und 0,1 mmol/l Rhodamin 640 zeigt ab 40 °C Filmtemperatur einen ausgeprägten und stetigen Abfall der Fluoreszenzintensität. Im Vergleich dazu zeigt das Signal einer Mischung aus Versuchsöl A mit 0,1 mmol/l Pyrromethen 567 einen leichten Anstieg des Signals von Raumtemperatur bis 120 °C. Der Messpunkt bei 140 °C musste aufgrund eines Dichtungsschadens an der Kalibriervorrichtung verworfen werden. Die Farbstoffmischung aus jeweils 0,1 mmol/l Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 zeigt ein deutlich höheres Signalniveau im Vergleich zu den einzeln getesteten Farbstoffen. Der Absolutwert ist jedoch nicht die Summe der beiden Einzelsignale. Dies deutet auf einen Energietransfer zwischen bei beiden gleichzeitig in Lösung befindlichen Farbstoffen hin. Der Signalverlauf steigt von 20 °C zuerst leicht an, um dann bei 80 °C in etwa wieder das Ausgangsniveau zu erreichen. Die Abweichung beträgt dabei 0,7%. Bei höheren Temperaturen ist ein leichter Signalverlust zu verzeichnen. Bei 140 °C erreicht das Signal 92,5% des Ausgangswerts bei Raumtemperatur. Thirouard gibt für die verwendete Farbstoffmischung eine Signalstärke von 85% bei 150 °C Schichttemperatur an. Diese Angabe deckt sich mit den hier vorgestellten Messungen.

4.2.6 Einfluss des Reflexionsgrades des optischen Hintergrundes

Bei der quantitativen Bestimmung der Schichtdicken mittels laserinduzierter Fluoreszenz muss der Reflexionsgrad des optischen Hintergrundes berücksichtigt werden. Zur Quantifizierung des Effekts wurde die Kalibriervorrichtung mit Gegenkörpern aus verschiedenen Materialien (Quarz, Aluminium, Stahl) ausgerüstet, die zusätzlich mit verschiedenen Oberflächenrauigkeiten (sandgestrahlt, geschliffen, poliert) versehen wurden siehe Abschnitt 4.2.1.

Die unterschiedlich stark ausgeprägte Oberflächenstruktur der Gegenkörper, die sich während des Versuchs mit fluoreszierendem Öl füllen, führen auch ohne den Einsatz von Präzisionsfolien zu einem Nullsignal, das mit der der Ölmenge in der Oberflächenstruktur korrespondiert. Aus diesem Grund werden pro Oberflächen mehrere unterschiedliche dicke Ölschichten mit Hilfe von Präzisionsfolien eingestellt. Die so erzeugten Datenpaare werden über eine lineare Regression miteinander verbunden. Die Auswertung der Signalstärke erfolgt über die Steigung der linearen Regression. Diese gibt somit die Signalstärke (counts) bezogen auf die Schichtdicke (μm) wieder, siehe Abbildung 45 und Abbildung 46.

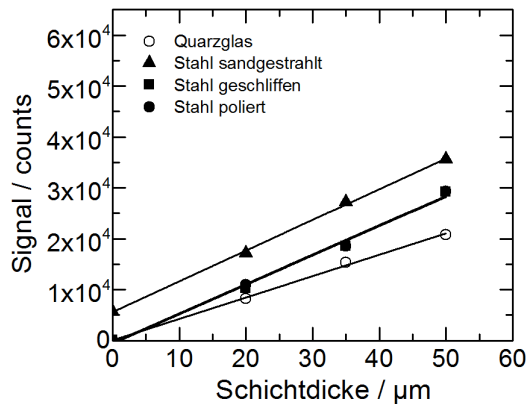


Abbildung 45: Signalstärke bei Variation der Schichtdicke mit verschiedenen rauen Stahloberflächen bei $0,3 \text{ mJ/mm}^2$ Beleuchtungsstärke und $0,02 \text{ mmol/l}$ Farbstoffkonzentration.

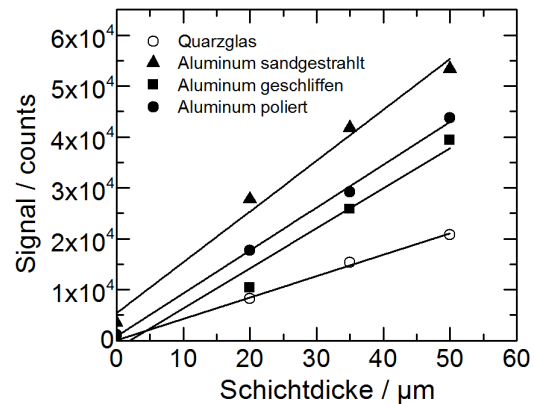


Abbildung 46: Signalstärke bei Variation der Schichtdicke mit verschiedenen rauen Aluminiumoberflächen bei $0,3 \text{ mJ/mm}^2$ Beleuchtungsstärke und $0,02 \text{ mmol/l}$ Farbstoffkonzentration.

Die Messreihen wurden unterteilt in Stahl- und Aluminiumoberflächen. Als Referenz ist jeweils zusätzlich die Messung mit einem Gegenkörper aus Quarzglas dargestellt. Die Auswertung der Signalsteigungen ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Auswertung der Geradensteigungen aus Abbildung 45 und Abbildung 46, gemessen bei 0,3 mJ/mm² Beleuchtungsstärke und 0,02 mmol/l Farbstoffkonzentration.

Gegenkörpermaterial	Steigung / counts/μm	σ
Quarzglas	420	13
Stahl sandgestrahlt	604	15
Stahl geschliffen	577	33
Stahl poliert	578	30
Aluminium sandgestrahlt	999	75
Aluminium geschliffen	788	90
Aluminium poliert	843	28

Die Messreihe mit dem Gegenkörper aus Quarzglas zeigt erwartungsgemäß die geringste Signalsteigung, da kaum Reflexionen an der Oberfläche zu erwarten sind. Die Ölschicht wird somit nur einmal vom Laserstrahl durchleuchtet und kein zusätzliches Fluoreszenzlicht wird zum Detektor reflektiert. Die Messreihen mit Stahloberflächen weisen im Vergleich dazu ein um etwa 50% erhöhtes Signal auf. Die Oberflächenrauigkeit scheint dabei eine untergeordnete Rolle zu spielen. Bei Verwendung von Gegenkörpern aus Aluminium sind die Signalsteigungen nochmals deutlich erhöht. Im Vergleich zur Messreihe mit Gegenkörpern aus Quarzglas sind die Signalsteigungen etwa doppelt so hoch. In Bezug auf den Einfluss der Oberflächenrauigkeit ist kein klarer Trend erkennbar. Der sandgestrahlte Gegenkörper aus Aluminium zeigt eine leicht erhöhte Signalsteigung im Vergleich zu den anderen Oberflächenrauigkeiten. Die sandgestrahlte Oberfläche ist jedoch, bedingt durch das Fertigungsverfahren und die geringe Härte des Aluminiums vergleichsweise uneben. Es ist zu erwarten, dass dies die Wiederholbarkeit der Platzierung der Präzisionsfolien negativ beeinflusst.

Die Voruntersuchungen mit der Kalibriervorrichtung zeigen, dass das ausgewählte optische System günstige Eigenschaften für die Bestimmung der Ölfilmstärke in der Kolbengruppe aufweist. Das Fluoreszenzsignal steigt bis zu einer bekannten Grenze, die von der Konzentration der Farbstoffe und der maximalen Schichtstärke abhängt, linear mit der Schichtstärke an. Das Signalniveau ist dabei stets ausreichend hoch. Mit steigender Laser-Pulsenergie sättigt das Fluoreszenzsignal, dies hat jedoch keinen Einfluss auf den linearen Anstieg des Fluoreszenzsignals mit der Schichtstärke. Das Temperaturverhalten der Farbstoffmischungen wird durch den gewählten Ansatz unter Ausnutzung von Reabsorption günstig beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass der Reflexionsgrad des optischen Hintergrunds einen großen Einfluss auf das Fluoreszenzsignal ausübt und bei der Kalibrierung der Messtechnik zu berücksichtigen ist.

5 Optische Analyse des Ölfilmverhaltens am RRV-Kolbenringtribometer

Dieses Kapitel beschreibt die Applikation der optischen Messtechnik am RRV-Kolbenringtribometer. Der Beschreibung des mechanischen Aufbaus und der Festlegung der Betriebsparameter folgt die Untersuchung des Oberflächeneinflusses der Reibpartner auf die tribologischen Untersuchungen. Dies erfolgt in Hinblick auf die optischen Messungen, deren Durchführung im Anschluss beschrieben wird.

5.1 Aufbau und Funktion des RRV-Kolbenringtribometers

Tribometer dienen zur Prüfung von modellhaften Reibkontakten in Bezug auf die tribologischen Messgrößen Reibung und Verschleiß. Dabei ermöglichen sie die Vorgabe von relevanten Betriebsparametern wie Normalkraft, Relativgeschwindigkeit, Temperatur oder Schmierstoffzufuhr während des Versuchs. In diesem Abschnitt wird das RRV-Kolbenringtribometer (Rotations-Reib-Verschleiß-Tribometer) in Aufbau und Funktion vorgestellt und die Applikation der optischen Messtechnik beschrieben.

5.1.1 Mechanischer Aufbau

Das RRV-Kolbenringtribometer dient zur Untersuchung der Reibpaarung zwischen Kolbenring und Zylinderwand unter dem Gesichtspunkt der Reibkraftmessung.

Der Kolben eines Verbrennungsmotors wird durch die Kurbelwelle einer ständig alternierenden Bewegung ausgesetzt. An den Totpunkten findet eine Umkehr der Bewegungsrichtung mit einhergehendem völligem Stillstand der Kolbenringe statt. Im Bereich des halben Hubs erreicht die Gleitgeschwindigkeit des Kolbens bis zu 25 m/s. Dieser hochdynamische Bewegungsablauf verhindert eine genaue Analyse der Reibwerte bei konstanter Gleitgeschwindigkeit. Das RRV-Kolbenringtribometer bedient sich im Gegensatz dazu einer speziellen Kinematik (siehe Abbildung 47).

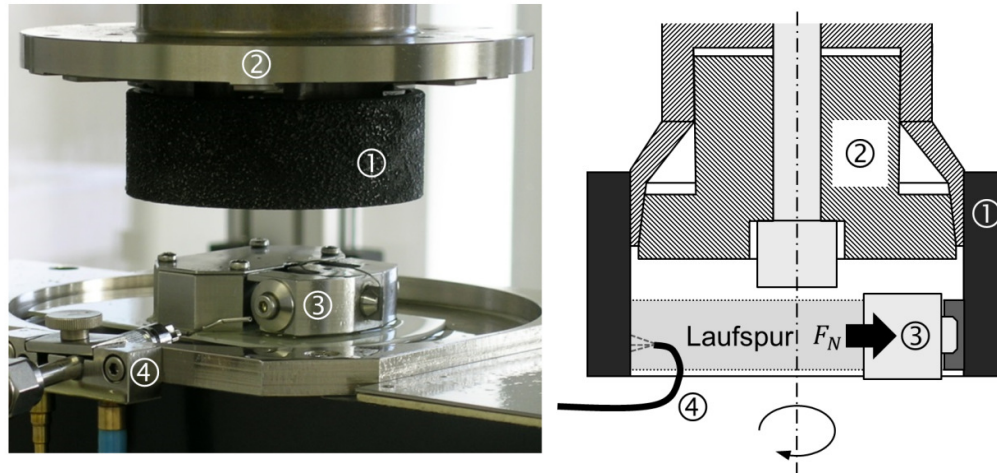


Abbildung 47: Aufbau des RRV-Kolbenringtribometers. ① Zylindersegment, ② Probenhalter Zylindersegment, ③ Probenhalter Kolbenringsegment, ④ Ölversorgungskapillare

Die Zylinderbuchse des Verbrennungsmotors wird für die Tribometerversuche in etwa 50 mm hohe Segmente unterteilt und mit Hilfe einer zentrischen Klemmvorrichtung in eine Spindel eingespannt. Diese Spindel ermöglicht die Drehung des Zylinderbuchsen-Segments um seine Achse. Ein speziell angefertigtes Kolbenringsegment wird während des Versuchs aufrecht an die Innenseite der Zylinderbuchse gepresst. Die dabei auftretenden Normal- und Reibkräfte werden erfasst und stellen die Messgrößen dar. Um einen Linienkontakt zu erreichen, ist die Lauffläche, abweichend vom kreisförmigen Serienkolbenring, plan. Die Laufflächengeometrie der Serien-Kolbenringe in Bezug auf die Zylinderwand wird dabei übernommen. Die relative Bewegungsrichtung des Kolbenrings bzw. des Kolbenringsegments wird somit von einer Auf- und Ab-Bewegung in eine Seitwärtsbewegung überführt. Die Kolbenringsegmente, die in dieser Arbeit verwendet werden, bestehen aus nichtrostendem Stahl (X90CrMoV18) und sind nitriert. Die Segmenthöhe beträgt 10 mm, die Lauffläche ist 2 mm breit. Dieses Maß entspricht der Ringhöhe im realen Motor. Abbildung 48 gibt Aufschluss über Details zu den Segmentmaßen. Der linienförmige Kontakt ist in Abbildung 49 dargestellt.

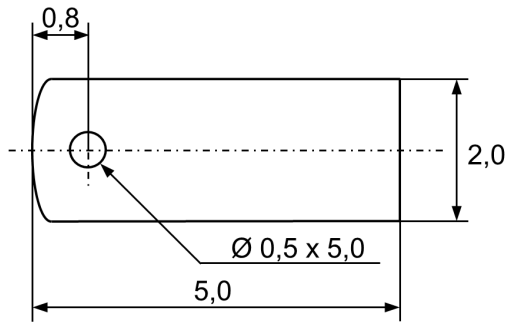


Abbildung 48: Maße des Kolbenringsegments in der Draufsicht

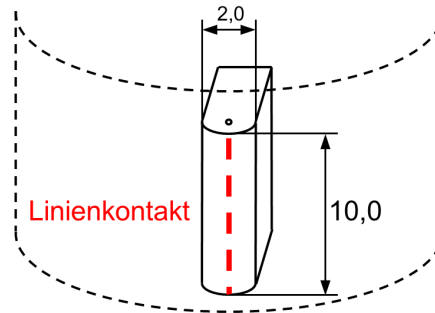


Abbildung 49: Linienkontakt des Kolbenringsegments im RRV-Kolbenringtribometer

Durch die im Vergleich zum Motor veränderte Mess-Geometrie kann die Relativgeschwindigkeit zwischen Kolbenring und Zylinderlaufbahn über die Spindeldrehzahl konstant eingestellt werden, alternierende Bewegungsabläufe entfallen und die Analyse der Reibkräfte in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit wird ermöglicht. Durch das feststehende Kolbenringsegment wird die Einstellung und Ermittlung der Normal- und Reibkräfte ermöglicht.

Die Versorgung mit Schmiermittel findet über eine Kapillare auf der Innenseite der Zylinderbuchse statt. Eine Pumpe fördert hierbei das Schmiermittel zum Tribometer. Dort kann zwischen zwei Beölungsvarianten gewählt werden: Einmal streift die Glaskapillare auf der Innenseite der Zylinderbuchse und hinterlässt auf dieser einen Ölstreifen. Alternativ kann die Glaskapillare etwas zurückgezogen und von einem Stickstoffstrom umspült werden. Dies hat zur Folge, dass das Schmiermittel beim Austritt aus der Glaskapillare vom Gasstrom mitgerissen wird und fein verteilt auf der Innenseite der Zylinderbuchse auftrifft. Jeweils nach einer dreiviertel Umdrehung gelangt das Schmiermittel schließlich in den Schmerspalt. Die Temperatur während der Messung kann mittels Infrarotheizer beeinflusst werden. Dieser befindet sich U-förmig um die Zylinderbuchse. Durch ein Thermoelement, das in einer Bohrung im Kolbenringsegment steckt, wird die Temperatur an der Reibstelle erfasst und dient zur Regelung der Infrarotheizung, siehe Abbildung 48 und Abbildung 49.

5.1.2 Festlegung der Betriebsparameter

Für die Festlegung der Versuchsparameter am RRV-Kolbenringtribometer, werden die Betriebsparameter des realen Motors M270/M274 zu Grunde gelegt. Dieser stellt als aufgeladener Motoren sein maximales Drehmoment über ein sehr breites Drehzahlband zur Verfügung. Die niedrigste Drehzahl, bei der schon das volle Moment anliegt beträgt etwa 1500 1/min. Die maximale Leistung wird bei der Nenndrehzahl von 5000 1/min abgegeben. Abbildung 50 zeigt den Verlauf der jeweiligen Gleitgeschwindigkeit über den Kurbelwinkel.

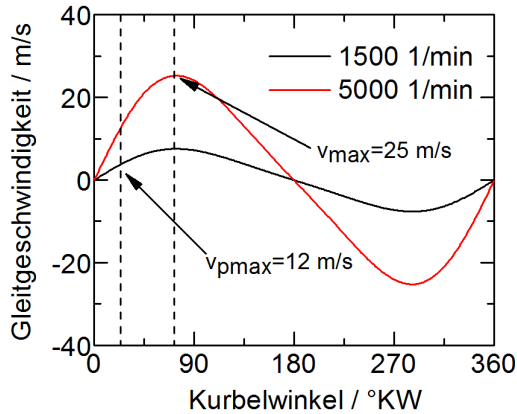


Abbildung 50: Gleitgeschwindigkeit des M270/M274 Kolbens über den Kurbelwinkel bei zwei verschiedenen Drehzahlen

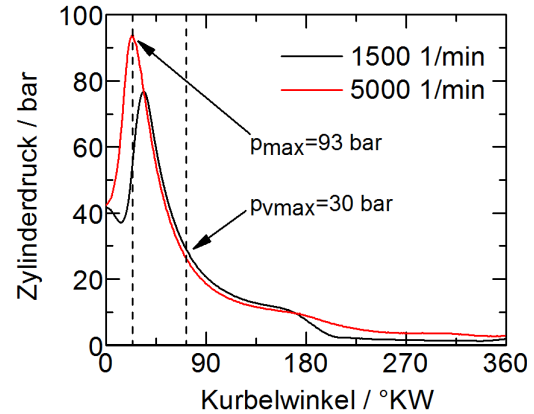


Abbildung 51: Zylinderdruckverlauf des M270/M274 über den Kurbelwinkel bei Vollast und zwei verschiedenen Drehzahlen

Korrespondierend dazu zeigt Abbildung 51 den Verlauf des Brennraumdrucks. Bei 1500 1/min wird ein Spitzendruck von 93 bar bei einer Gleitgeschwindigkeit von 12 m/s erreicht. Gemäß Gleichung (6), (Abschnitt 2.2.1), entspricht dies einer Normalkraft auf das Kolbenringsegment von etwa 100 N. Diese Belastung wirkt jedoch nur kurz auf das Ringsegment. Da die Betriebspunkte am RRV-Kolbenringtribometer stationär eingestellt werden, wurde zum Schutz vor Überlast eine maximale Normalkraft von 50 N gewählt.

Die maximale Gleitgeschwindigkeit im Motor von 25 m/s bei 5000 1/min wird ebenfalls nur in einem kleinen Bereich des Kolbenhubs erreicht. Im RRV-Kolbenringtribometer wird daher eine maximale Gleitgeschwindigkeit von 12 m/s gewählt.

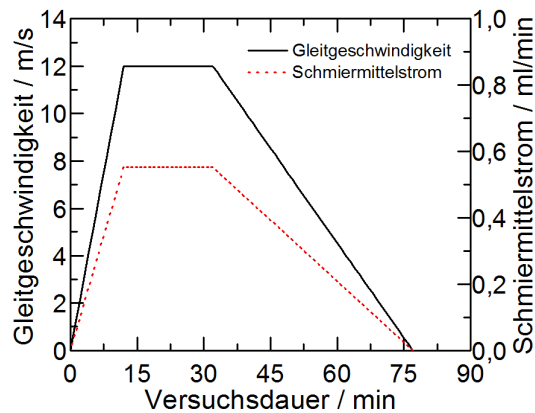


Abbildung 52: Verlauf von Gleitgeschwindigkeit und Schmiermittelstrom während des Tribometertests

Abbildung 52 zeigt den Verlauf der Gleitgeschwindigkeit über den Prüflauf. Zu Beginn wird die Gleitgeschwindigkeit mit einem Gradienten von 1 m/s pro Minute gesteigert,

bis die maximale Gleitgeschwindigkeit erreicht ist. Diese wird dann für 20 Minuten gehalten. Während dieser Phase kann sich die Temperaturregelung stabilisieren. Im Rahmen der Arbeit wurde stets eine Segmenttemperatur von 80°C gewählt und die Ölversorgungseinheit so eingestellt, dass pro Umdrehung des Tribometers eine Ölmenge von 0,2 mm³ dem Reibkontakt zur Verfügung steht.

5.1.3 Einfluss der Laufflächenmaterialien auf die Tribologie

Zur optischen Analyse des Schmierfilmverhaltens im tribologischen Kontakt ist ein transparenter optischer Zugang notwendig. Beim RRV-Kolbenringtribometer wird dieser durch den Austausch des metallischen Zylindersegments durch ein Zylindersegment aus Quarzglas erreicht, siehe Abschnitt 5.2. Abbildung 53 zeigt die beiden Versuchsteile.



Abbildung 53: Zylindersegmente des RRV-Kolbenringtribometers: ① Konventionelles Zylindersegment aus Grauguss, ② Transparentes Zylindersegment aus Quarzglas

Um den Einfluss des optischen Zugangs auf die Vorgänge im Schmierpalt abschätzen zu können, wird der Benetzungswinkel von Motoröl auf verschiedenen Zylinderlaufbahnmaterialien sowie den optisch transparenten Materialien Quarzglas und Saphir bestimmt. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Reibkraftmessung am RRV-Kolbenringtribometer unter Verwendung von Grauguss- und Quarzglaszylinder miteinander verglichen.

Benetzungswinkelmessung

Das Verhalten einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche wird durch deren rheologische Eigenschaften sowie der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Ein zentraler Gesichtspunkt ist hierbei die Benetzbarkeit der Oberfläche durch das flüssige Medium, die durch die Grenzflächenspannung charakterisiert wird.

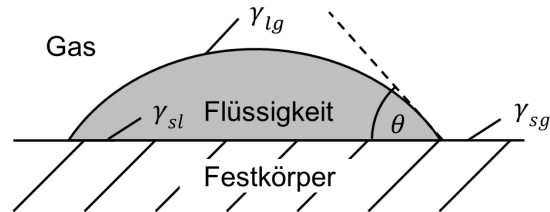


Abbildung 54: Ermittlung des Benetzungswinkels

Das typische Verhalten eines Flüssigkeitstropfens auf einer Oberfläche zeigt Abbildung 54. Der Tropfen liegt auf der Oberfläche auf und die kreisförmige Tropfenkontur trifft dabei unter einem charakteristischen Winkel, dem Benetzungswinkel, auf die Oberfläche des Festkörpers. Das Verhalten des Tropfens lässt so Rückschlüsse auf die Grenzflächenspannungen zu. Der Zusammenhang zwischen Benetzungswinkel und Grenzflächenspannung wird durch die Young-Gleichung beschrieben [105]:

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (35)$$

Mit θ : Benetzungswinkel, in Grad

γ_{sg} : Grenzflächenspannung Festkörper/Gas, in N/m

γ_{sl} : Grenzflächenspannung Festkörper/Flüssigkeit, in N/m

γ_{lg} : Grenzflächenspannung Flüssigkeit/Gas, in N/m

Das Verhältnis der einzelnen Grenzflächenspannungen bestimmt somit die Form des Tropfens auf der Oberfläche und ein mehr oder weniger großer Teil der Bauteiloberfläche wird durch einen einzelnen Tropfen benetzt. Das Benetzungsverhalten kann somit durch die optische Bestimmung des Benetzungswinkels θ ermittelt werden. Dabei wird die Tropfenkontur als Kreis angenähert an den in der Kontaktstelle mit der Oberfläche (Dreiphasenpunkt) eine Tangente angelegt wird. Der Benetzungswinkel ergibt sich zwischen der Tangente und der Oberfläche. Je größer der Benetzungswinkel ist, desto geringer ist die Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Bauteiloberfläche an deren Grenzfläche. Die Benetzbarkeit ist dann gering.

Bei der Untersuchung des tribologischen Systems der Kolbengruppe hat man es jedoch nicht mit ebenen Oberflächen zu tun. Um den Einfluss der unterschiedlichen Laufbahnmaterialien und deren Oberflächenrauigkeit auf die Benetzbarkeit untersuchen zu können, wird der Benetzungswinkel an einem Tropfen auf der Oberfläche der

jeweiligen Zylinderbuchsen mit einem Durchmesser von 83 mm untersucht. Die dadurch veränderte Geometrie zur Ermittlung des Benetzungswinkels zeigt Abbildung 55.

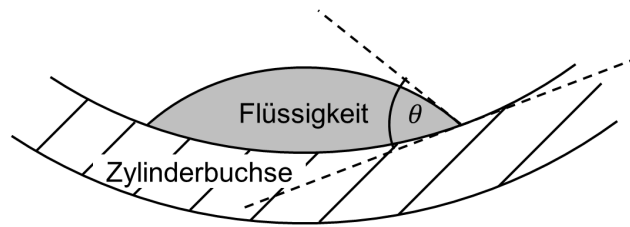


Abbildung 55: Ermittlung des Benetzungswinkels in der Zylinderbuchse

Die Bestimmung des Benetzungswinkels an der gekrümmten Oberfläche wird durch das Anlegen einer Tangente an die Zylinderkontur erreicht. Dies ermöglicht vergleichende Messungen, die jedoch nur bedingt mit den Literaturwerten übereinstimmen, die auf völlig ebenen Flächen ermittelt wurden.

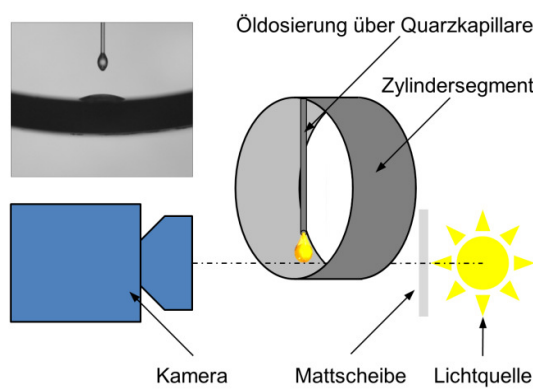


Abbildung 56: optischer Aufbau zur Ermittlung des Benetzungswinkels

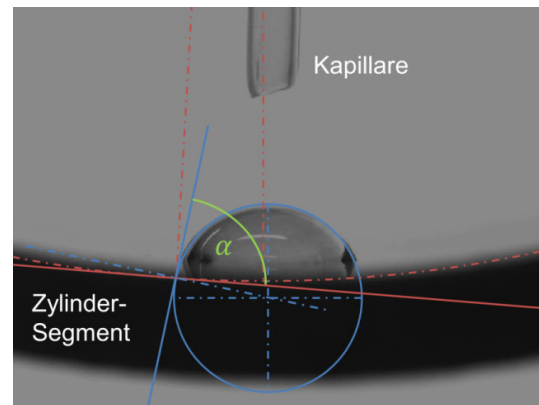


Abbildung 57: Ermittlung des Benetzungswinkels von Wasser auf der Zylinderoberfläche

Abbildung 56 zeigt den Versuchsaufbau zur Ermittlung des Benetzungswinkels. Mit einer Kapillare wird ein Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit auf die Innenseite des Zylindersegments aufgetropft. Das Auftreffen des Tropfens auf die Oberfläche wird von einer Kamera erfasst. Beim Auftreffen des Tropfens auf der Oberfläche gerät dieser in Schwingungen, die jedoch rasch abklingen. Bedingt durch die Riefen der Honstruktur zerfließt der Flüssigkeitstropfen mit der Zeit auf der Oberfläche, bis ein Ablesen des Benetzungswinkels schließlich unmöglich wird. Um die Vergleichbarkeit der Messungen untereinander gewährleisten zu können, wird der Zustand des Tropfens daher exakt eine Sekunde nach Auftreffen des Tropfens auf der Oberfläche ausgewertet. Die Schwingungen des Tropfens sind dann abgeklungen und der Tropfen ist nahezu stationär auf der Oberfläche. Das resultierende Bild und die Ermittlung des Benetzungswinkels durch Anlegen von Tangenten an die Tropfen- und Zylinderkontur zeigt

Abbildung 57. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde ein Vorversuch mit destilliertem Wasser durchgeführt und die Ergebnisse mit Literaturwerten verglichen. Dazu wurde in elf Versuchen jeweils ein Tropfen Wasser mittels einer Kapillare auf die gekrümmte Oberfläche einer gehonten und mittels Reinigungsbenzin (Gemisch von n-, i- und cyclo-Aliphaten, überwiegend im Bereich C7 – C9) und Isopropanol gereinigten Grauguss-Zylinderbuche getropft. Der Wert von $75,5^\circ$ decken sich mit Literaturangaben zu Benetzungswinkeln von Wasser auf rauen Stahloberflächen im Bereich von 65 bis 90° [106, 107]. Die Standardabweichung der Messreihe beträgt $4,4^\circ$. Kubiak [106] dokumentiert einen Einfluss der Oberflächenstruktur auf den Benetzungswinkel. Daher wurde die Messung der Benetzungswinkel neben den optischen Zugängen an den eisenbasierten Laufflächenmaterialien mit verschiedenen Honstrukturen durchgeführt. Dabei kommen die in dieser Arbeit verwendeten Versuchsöle A und B zum Einsatz. Diese sind für die Messung mit der LIF-Farbstoffmischung versehen. Dies hatte neben der Vergleichbarkeit zu den optischen Messungen zudem den Vorteil der besseren Sichtbarkeit bei der Benetzungswinkelmessung. Vor Versuchsbeginn wurde die Masse eines Öltropfens ermittelt. Dazu wurden jeweils 20 Tropfen über eine Quarzkapillare in eine Wägeschale getropft und anschließend gewogen:

Öl A hat eine Tropfenmasse von 2,89 mg

Öl B hat eine Tropfenmasse von 3,10 mg

Die Tropfenmasse sowie die aus den optischen Aufnahmen resultierende Tropfenvolumina sind bei den beiden Versuchsölen vergleichbar groß. Die Bilder der Benetzungswinkelmessung sind in Abbildung 58 dargestellt, Tabelle 5 listet die Ergebnisse der Benetzungswinkelmessungen auf. Die Honungen 1 bis 5 sind nach ansteigender Rauigkeit angeordnet. Die LDS Spritzschichten unterscheiden sich geringfügig in ihren Legierungselementen.

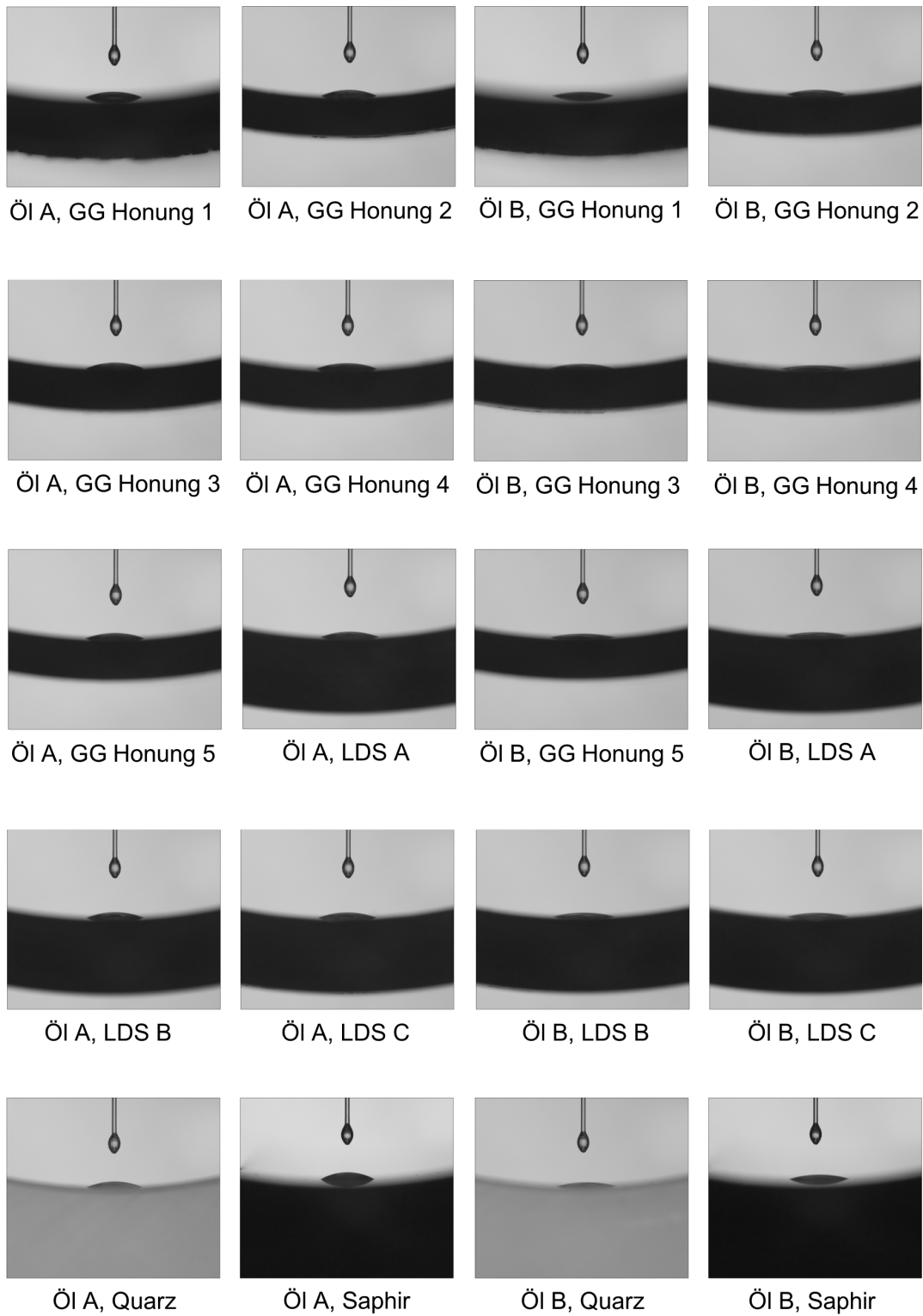


Abbildung 58: Übersicht Benetzungswinkelmessungen

Tabelle 5: Ergebnisse der Benetzungswinkelmessung mit den Versuchsölen A und B an verschiedenen Laufbahnmaterialien

Probe	Öl A	Öl B
	HTHS 2.9	HTHS 1.4
Grauguss, Honung 1, Öl	24°	17°
Grauguss, Honung 2, Öl	26°	21°
Grauguss, Honung 3, Öl	25°	19°
Grauguss, Honung 4, Öl	23°	14°
Grauguss, Honung 5, Öl	23°	14°
LDS A Spritzschicht, Öl	23°	17°
LDS B Spritzschicht, Öl	23°	16°
LDS C Spritzschicht, Öl	23°	17°
Quarz, optisch poliert, Öl	25°	17°
Saphir, geschliffen, Öl	31°	20°

Der Vergleich zwischen den beiden Versuchsölen zeigt stets deutlich kleinere Benetzungswinkel bei dem dünnflüssigeren Öl B. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit muss differenziert betrachtet werden. Tendenziell sinken die Benetzungswinkel mit steigender Oberflächenrauigkeit. Die sehr glatte Oberfläche der Honung 1 zeigt jedoch dazu abweichend Benetzungswinkel im mittleren Bereich. Die Honungen 2 bis 5 haben eine zunehmende Profilhöhe mit damit verbundenen stärker ausgeprägten Riefen auf der Oberfläche. Während eine moderate Rauigkeit ohne ausgeprägte Riefen den Öltropfen möglicherweise eher am Zerfließen hindert, und damit zu leicht erhöhten Benetzungswinkeln beiträgt, haben Riefen in der Oberfläche den gegenteiligen Effekt. Sie leiten das Öl aus dem Tropfen in die Umgebung ab und führen so zu geringeren Benetzungswinkeln. Aus diesem Grund ist auch die Vermessung von Kraftstoff-Kontaktwinkeln mit dieser Methode nicht möglich. Die gute Benetzbarkeit in Kombination mit der geringen Viskosität führt zum sofortigen Zerlaufen des Tropfens. Die Oberflächenbeschaffenheit der gespritzten LDS-Lauflächen A, B und C unterscheidet sich kaum. Trotz der jeweils leicht verschiedenen Werkstoffzusammensetzung sind die Benetzungswinkel mit dem jeweiligen Öl nahezu gleich. Die Absolutwerte reihen sich in die der Grauguss-Oberfläche ein. Unter optisch transparenten Materialien weist das optisch polierte Quarzglas nahezu die gleichen Benetzungswinkel auf, die auch die Grauguss- und die LDS-Proben zeigen. Der Benetzungswinkel von Öl A auf der Sa-

phir-Oberfläche fällt mit 31° etwas größer aus als bei den eisenbasierten Werkstoffen. Die Oberfläche des Saphirfensters ist jedoch nicht optisch poliert, sondern matt. Möglicherweise trägt die leichte Rauigkeit der Oberfläche zu den erhöhten Benetzungswinkeln bei. Insgesamt betrachtet bewegen sich die gemessenen Benetzungswinkel der Grauguss-, LDS-, Quarz- und Saphir-Oberflächen in einem ähnlichen Bereich. Es ist somit davon auszugehen, dass die Materialien der optischen Zugänge das Verhalten des Schmiermittels nicht wesentlich verändern.

Zusätzlich zu den Kontaktwinkelmessungen wurden Vergleichsmessungen zwischen Grauguss- und Quarzglasproben am RRV-Kolbenringtribometer unternommen. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu untersuchen, werden die durch das Tribometer ermittelten Stribeckkurven aus Versuchen mit gehontem Graugusszylinder und poliertem Quarzglas-Zylinder miteinander verglichen.

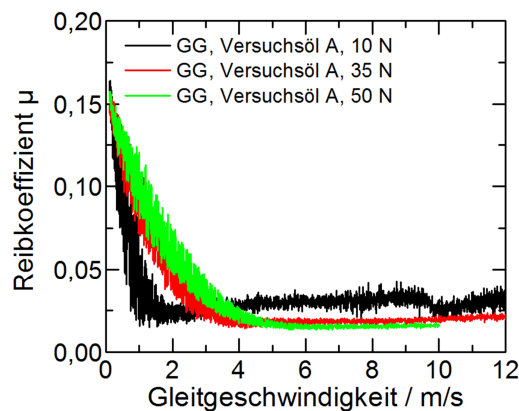


Abbildung 59: Stribeckkurve des nitrierten Kolbenringsegments gegen Grauguss mit Honung 2, 80°C , Versuchsöl A

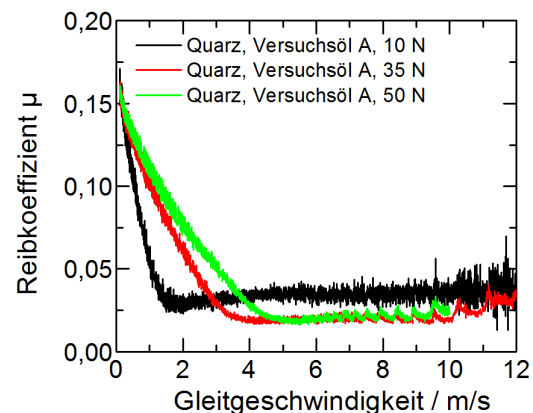


Abbildung 60: Stribeckkurve des nitrierten Kolbenringsegments gegen poliertes Quarzglas, 80°C , Versuchsöl A

Abbildung 59 zeigt den Verlauf der Stribeckkurven auf einer gehonten Graugussoberfläche mit der Honung 2. Diese unterscheiden sich bei der Verwendung von Versuchsöl A kaum von den Stribeckkurven auf Quarzglas, die in Abbildung 60 dargestellt sind. Die Stribeckkurven auf der Quarzglasoberfläche zeigen zudem eine geringere Streubreite. Dies ist durch den Aufbau des RRV-Kolbenringtribometers bedingt. Die radiale Anordnung des Kolbenringsegments zur Zylinderlaufbahn macht den Versuch anfällig für eventuelle Unrundheiten des Zylindersegments. Die Quarzglaszylindersegmente sind bezüglich der Fertigungstoleranzen den Graugusszylindersegmenten überlegen. Dieser Effekt tritt besonders deutlich bei den Ergebnissen der Versuchsreihe mit Versuchsöl B auf. Abbildung 61 zeigt die Stribeckkurven von Versuchsöl B auf einer gehonten Graugussoberfläche mit der Honung 2. Durch eine Unrundheit des Zylindersegments streut der gemessene Reibwert stark. Eine Tiefpassfilterung des Signals wurde aufgrund der im Vergleich zur Drehzahl des Tribometers sehr geringen Abtastrate des Reibwertes nicht durchgeführt.

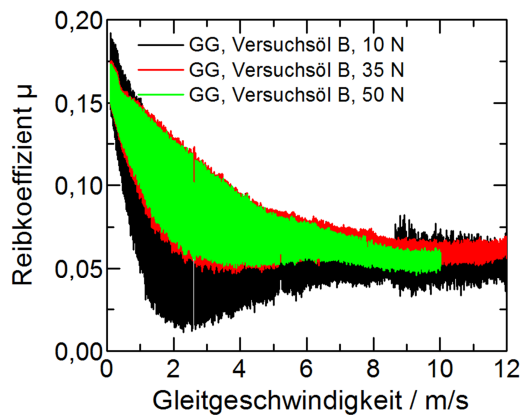


Abbildung 61: Stribeckkurve des nitrierten Kolbenringsegments gegen Grauguss mit Honung 2, 80 °C, Versuchsöl B

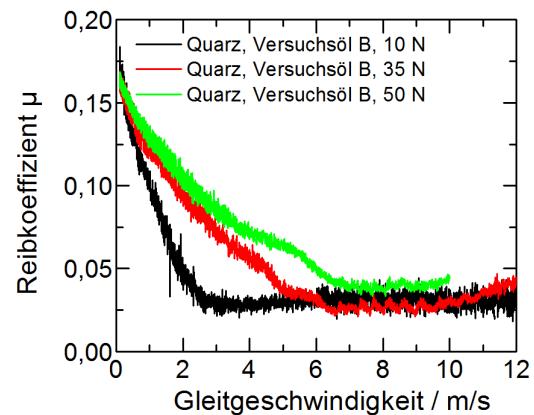


Abbildung 62: Stribeckkurve des nitrierten Kolbenringsegments gegen ungehontes Quarzglas, 80 °C, Versuchsöl B

Der präzise geschliffene Quarzglaszylinder zeigt dieses Verhalten nicht, siehe Abbildung 62. Der Verlauf der Kurven ist deutlich besser definiert. Vergleicht man die beiden Messungen mit Versuchsöl B auf Grauguss bzw. Quarzglas miteinander, stellt man vor allem in unteren Geschwindigkeitsbereich vergleichbare Kurvenverläufe fest.

Kolbenringsegmente

Um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf das Verhalten des Ölfilms zu untersuchen, wurde ein Segment poliert. Die Oberfläche sowohl des unbearbeiteten als auch des polierten Kolbenringsegments wurde vor und nach dem Versuchslauf mit einem Konfokalmikroskop vermessen (Abbildung 63). Das polierte Kolbenringsegment ist an den Seitenrändern durch die manuelle Politur deutlich abgerundet. Die Oberflächen der jeweiligen Segmente ändern sich durch den Versuchslauf kaum.

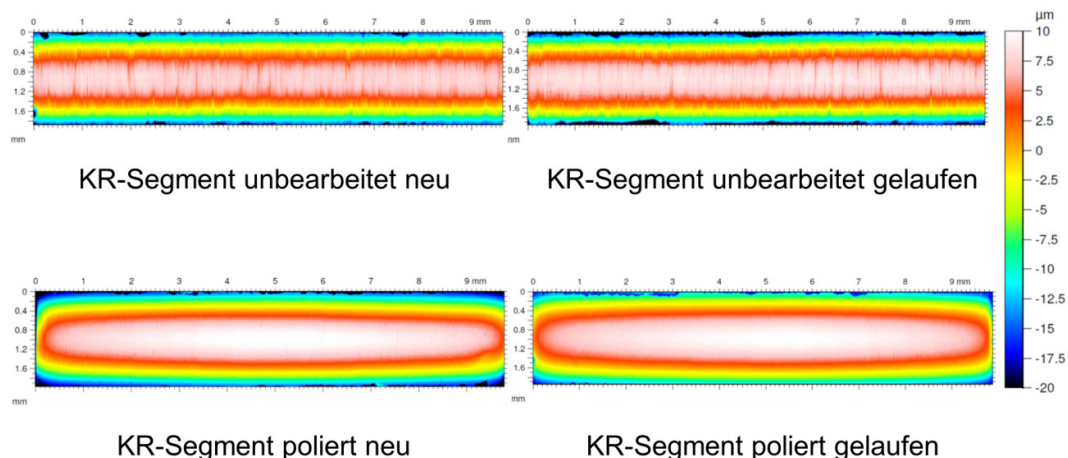


Abbildung 63: Oberflächenanalyse der Kolbenringsegmente

5.2 Applikation der phasengekoppelten optischen Messtechnik

Vorbereitend auf die optischen Messungen wurde das Tribometer-Labor für den Betrieb eines Lasers ausgerüstet. Der Aufbau der Messtechnik im Labor zeigt Abbildung 64. Der Laser ist auf einem Wagen vor dem Tribometer positioniert und das Laserlicht wird mittels Laserlicht-Führungsarm in die Tribometerkabine geleitet. Die Fensteröffnungen sind mit Schutzvorhängen verschlossen, um den Austritt von Laserstrahlung in die Umgebung zu verhindern. Ein weiterer Vorhang trennt das Tribometer vom restlichen Teil des Labors, um den Steuerrechner während der Messung bedienen zu können. Die Labortüre ist über eine Interlock-Schaltung mit der Steuerung der optischen Messtechnik gekoppelt. Diese schaltet den Laser beim Öffnen der Tür ab. Zum Betrieb des Lasers im Labor wurden weiterhin Anschlüsse für Kühlwasser sowie ein Stromanschluss installiert.

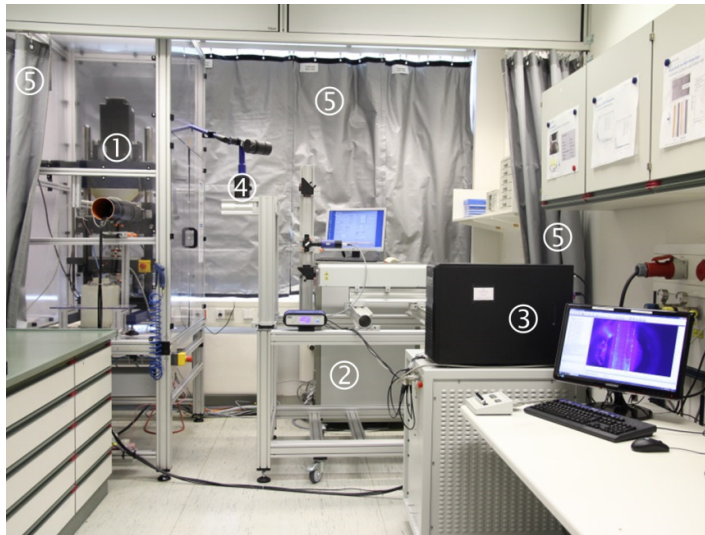


Abbildung 64: Aufbau der Messtechnik im Tribometer-Labor: ① RRV-Kolbenringtribometer, ② Steuerrechner RRV, ③ Steuerrechner optische Messtechnik, ④ Laserlicht-Führungsarm, ⑤ Laserschutzvorhang

Zur phasengekoppelten Auslösung der Aufnahmen während der Messung ist der Winkelgeber des Tribometers mit einem elektrischen Abgriff versehen. Die Drehwinkelsignale werden zum Steuerrechner der optischen Messtechnik geleitet. Zusätzlich können Informationen über Drehzahl, Temperatur sowie Normal- und Reibkraft per Analog-Digital-Wandler an das optische Messsystem übertragen werden.

5.2.1 Optischer Zugang und Strahlführung

Der optische Zugang zum Reibkontakt wird durch den Austausch der metallischen Zylinderbuchse durch einen Ring aus Quarzglas gewährleistet, der den direkten Blick auf die $2 \times 10 \text{ mm}^2$ große Lauffläche des Kolbenringsegments ermöglicht. Abbildung 65 zeigt den Messbereich des Tribometers.

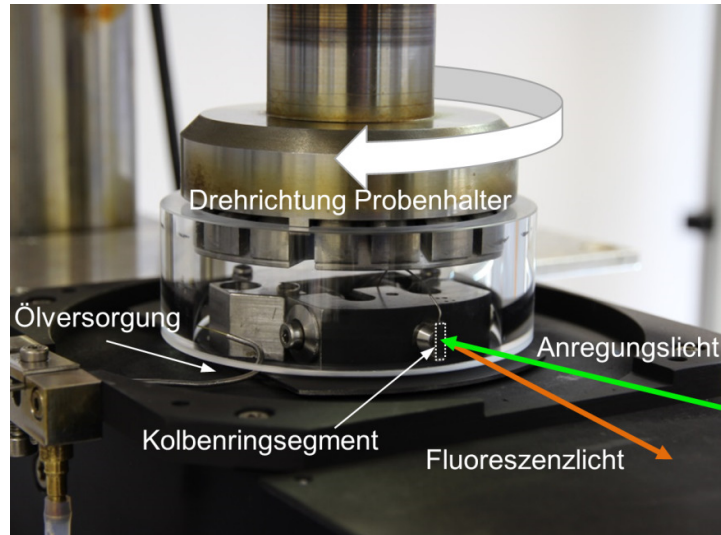


Abbildung 65: Detailansicht Probenhalterung

Das Kolbenringsegment ist in eine Haltevorrichtung gespannt, die zur Vermeidung von Reflexionen schwarz lackiert wurde. An der Oberseite des Kolbenringsegments sieht man das Thermoelement, das zur Regelung der Versuchstemperatur dient. Auf der linken Seite führt ein Stahlröhrchen die Quarzglas-Kapillare auf die Innenseite des Zylindersegments. Entsprechend der Drehrichtung wird das Öl an der Innenseite des Zylinders von rechts kommend in den Reibkontakt gefördert. Abbildung 66 zeigt die Seitenansicht des Tribometers. Die Beobachtung des Reibkontaktes erfolgt senkrecht auf das Kolbenringsegment. Aufgrund von Bauraumbeschränkungen durch einen Pfosten des Tribometers kommt hierzu ein Spiegel zum Einsatz, der eine Ablenkung des Strahlengangs um 90° ermöglicht. Das Anregungslicht wird ebenfalls frontal unter einem Winkel von etwa 35° auf die Messstelle geführt. Die Optik zur Strahlaufweitung befindet sich hinter dem Umlenkspiegel. Diese verstellbare Optik weitet den Laserstrahl so auf, dass der beleuchtete Bereich in der Fokusebene eine kreisrunde Struktur von etwa 15 mm Durchmesser aufweist. Mit Hilfe einer Spaltblende wird der Strahl an den Rändern soweit abgeschattet, dass nur der unmittelbare Bereich des Kolbenringsegmentes beleuchtet wird. Auch die Spaltblende ist im Bild verdeckt. Aufgrund von Interferenzeffekten an den Kanten der Spaltblende wurde der beleuchtete Bereich etwas größer gewählt, um eine möglichst gleichmäßige Beleuchtung des Kolbenringsegmentes zu erreichen.

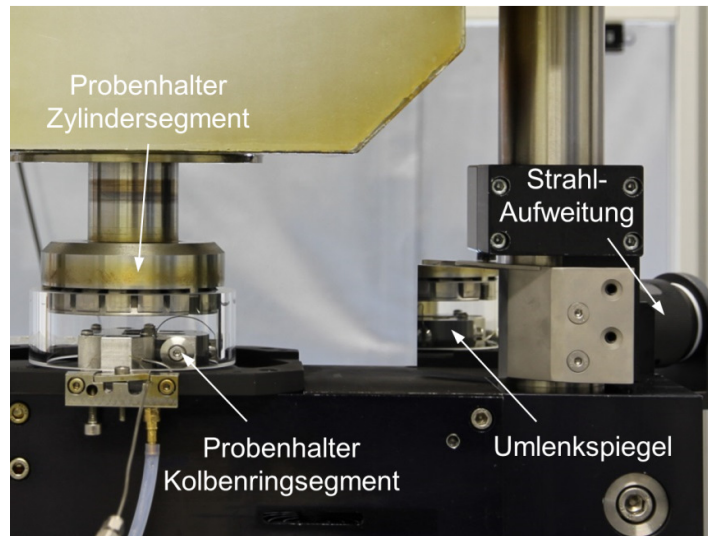


Abbildung 66: Seitenansicht RRV-Kolbenringtribometer

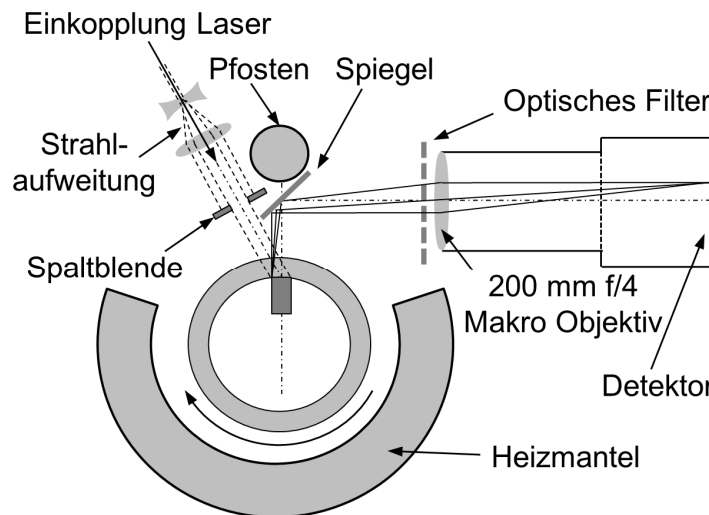


Abbildung 67: Strahlführung am RRV-Kolbenringtribometer

Eine schematische Übersicht der Strahlführung ist in Abbildung 67 zu sehen. Diese zeigt eine Draufsicht des Tribometers. Das kreisförmige Zylindersegment wird von einem U-förmigen Heizmantel umschlossen. Im Innern des Zylinders befindet sich das Kolbenringsegment. Dieses ist zur besseren Sichtbarkeit etwas vergrößert dargestellt. Ausgehend vom Laserkopf wird das Anregungslicht über zwei Umlenkspiegel in den Laserlicht-Führungsarm eingekoppelt. Der Laserlicht-Führungsarm leitet den Laserstrahl in das Innere der Tribometerumhausung, wo er mittels einer Optik so aufgeweitet wird, dass er das komplette Kolbenringsegment beleuchtet. Überschüssiges Laserlicht wird durch eine einstellbare Spaltblende abgeschnitten, wodurch sich ein rechteckiges Strahlprofil ergibt. Der formatierte Laserstrahl trifft nun unter einem Winkel von etwa 35° auf das Kolbenringsegment und regt das mit Farbstoffen versehene Schmieröl zur

Fluoreszenz an. Das detektierte Fluoreszenzlicht wird über den Spiegel zur Seite abgelenkt. Hier befindet sich die Kamera, die mit einem Makroobjektiv mit 200 mm Brennweite und einer maximalen Blendenzahl von $f/4$ (Nikon AF Micro Nikkor 200 mm) versehen ist. Um Reste von gestreutem und reflektiertem Anregungslicht vom Detektor fernzuhalten, ist dem Objektiv ein optisches Filter vorgeschaltet. Mit dem verwendeten Nikon Objektiv wird das $10 \times 2 \text{ mm}^2$ große Kolbenringsegment auf etwa 250×1250 Pixel des Kamerasensors projiziert. Die daraus resultierende projizierte Pixelgröße beträgt demzufolge $8 \times 8 \text{ }\mu\text{m}^2$.

Bedingt durch die Strahlführung und den Zuschnitt des Strahlprofils auf die Messstelle gelangt nicht die komplette Energie des Laserpulses an die Messstelle. Mit Hilfe eines Laser-Pulsenergie-Messgerätes wurde der Energieverlust entlang des Strahlengangs dokumentiert, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Verteilung der Laserleistung entlang des Strahlengangs

Position	Pulsenergie	%
am Laserausgang	105 mJ	100
hinter Laserlicht-Führungsarm	84 mJ	80
hinter Strahlaufweitung	60 mJ	57
hinter Spaltblende	9 mJ	9

Direkt am Laserausgang wird eine Pulsenergie von 105 mJ erreicht. Durch die Strahlführung im Laserlicht-Führungsarm gehen 20% der Pulsenergie verloren, durch die Strahlaufweitungsoptik weitere 23%. Der größte Teil der Pulsenergie wird jedoch bei der Formatierung des Strahls auf das Kolbenringsegment durch die Spaltblende abgetrennt, um eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung der Messstelle zu erreichen. Von den ursprünglich 105 mJ am Laserausgang bleiben noch 9 mJ an der Messstelle. Das Kolbenringsegment hat eine Größe von $10 \times 2 \text{ mm}^2$. Um Interferenzeffekte, die durch Beugung an den Kanten der Spaltblende entstehen, aus dem Messbereich zu entfernen, wird ein Bereich von etwa $11 \times 3 \text{ mm}^2$ beleuchtet. Daraus resultiert eine Bestrahlungsstärke von etwa $0,3 \text{ mJ/mm}^2$. Dies entspricht dem Wert bei den Grundlagenuntersuchungen mit der Kalibriervorrichtung bei 100% Pulsenergie.

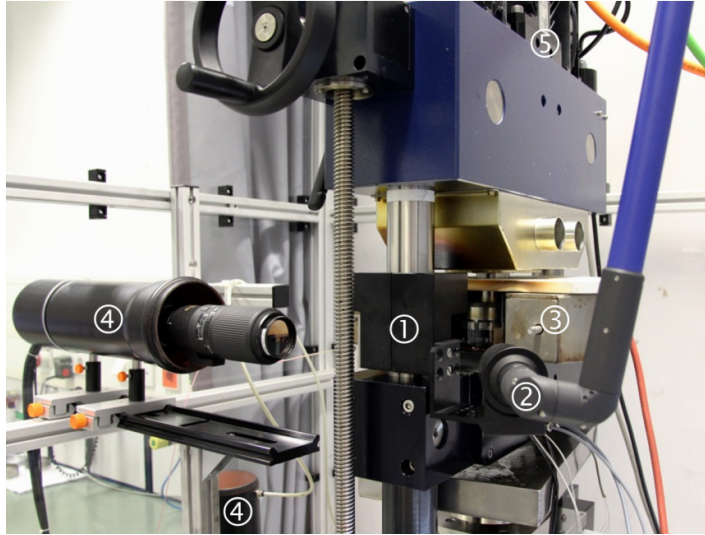


Abbildung 68: Innenansicht RRV-Kolbenringtribometer: ① Halterung Spiegel und Laseroptik, ② Strahlaufweitung, ③ Heizmantel, ④ Schutzhülle Kamera, ⑤ Winkelgeber Spindel

Abbildung 68 zeigt die Innenansicht der Tribometerkabine mit dem optischen Aufbau und appliziertem Heizmantel. Der Laserlicht-Führungsarm führt das Laserlicht von außen zur Messstelle und geht am Tribometer in die Optik zur Strahlaufweitung über. Diese ist zusammen mit dem Ablenkspiegel an einer Halterung am Tribometerpfosten befestigt. Die Kamera ist auf einer Schiene montiert und zum Schutz vor Ölnebel in einem Rohr untergebracht. Dieses wird zur Vermeidung vor Überhitzung der Kamera mit Druckluft gespült. Das zum Tribometer weisende Rohrende ist mit einer Glasscheibe verschlossen. Die Schutzhülle ist zur Justierung der Optik teilbar ausgeführt. Das Bild zeigt die Schutzhülle im geteilten Zustand.

5.2.2 Versuchsvorbereitungen

Um mit der LIF-Technik Angaben über die Schichtdicke des Ölfilms im Reibkontakt machen zu können, muss das Messsystem kalibriert werden. Eine ungleichmäßige Ausleuchtung des Messbereichs oder Effekte wie z.B. Vignettierung werden durch eine Flachfeldkorrektur berücksichtigt, die die Antwortfunktion des gesamten optischen Systems darstellt.

Theorie der Flachfeldkorrektur

Die folgenden Überlegungen basieren auf einem linearen Signalmodell. (Bezüglich der Laser-Pulsenergie ist dies jedoch nicht zutreffend, siehe Abschnitt 4.2.4. An dieser Stelle wird daher eine Korrektur eingeführt). Für die Korrektur des vom Detektor aufgenommenen Rohbildes R benötigt man das so genannte Dunkelbild D und das Flachfeld-Bild F . Großbuchstaben stehen hierbei für die zweidimensionale Bildmatrix die wie folgt definiert ist:

$$B = (b_{i,j}) \quad (36)$$

Mit B : Zweidimensionale Bildmatrix

i : *Pixel* in horizontaler Richtung

j : *Pixel* in vertikaler Richtung

$b_{i,j}$: *Helligkeitswert* des jeweiligen Pixel, in counts

Das Dunkelbild erhält man üblicherweise durch eine Aufnahme der Messstelle bei Abwesenheit des zu messenden Phänomens. Dadurch werden Effekte wie zurückgestreutes Laserlicht oder ein fluoreszierender optischer Zugang korrigiert. Die vollständige Entfernung des fluoreszenzmarkierten Öls von der Messstelle ist jedoch kaum möglich, da sich stets Ölreste in den Oberflächenrauigkeiten befinden. Aufgrund des langwelligen Anregungslichts von 532 nm ist eine Fluoreszenzanregung des Quarzglasrings auszuschließen und das Bandpassfilter trennt gestreutes Anregungslicht zuverlässig ab. Daher erfolgt in diesem Fall die Dunkelbildaufnahme mit geschlossenem Objektivdeckel. Das Signal, das nun ermittelt wird, setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen. Aufgrund der spontanen Bildung freier Ladungsträger auf dem lichtempfindlichen Halbleiter-Bildsensor entsteht ein Dunkelstrom. Zusätzlich wird dem A/D-Wandler der Kamera ein Offset zugewiesen, um Nullwerte zu vermeiden. Zur Korrektur dieser Effekte wird das Dunkelbild von allen aufgenommenen Bildern abgezogen. Ein Dunkelbild der verwendeten CMOS-Kamera zeigt Abbildung 69. Der Mittelwert aller Bildpunkte des Dunkelbildes beträgt etwa 390 counts, dies entspricht 0,6% des maximalen Messsignals von 65536 counts.

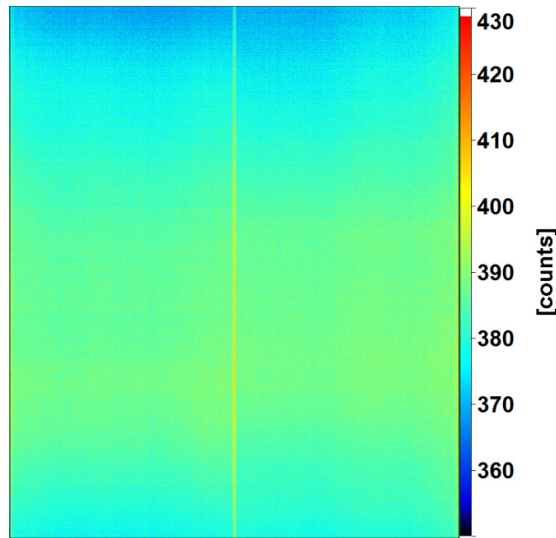


Abbildung 69: Dunkelbild der CMOS-Kamera des phasengekoppelten Systems

Für die Aufnahme des Flachfeld-Bildes wird eine Schicht benötigt, die einfallendes Anregungslicht proportional in Fluoreszenzlicht umsetzt. Dies gelingt beispielsweise, indem eine Schicht mit konstanter Filmdicke erzeugt und in den Strahlengang eingebracht wird. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Zuordnung der Bildpunkte von Flachfeld-Bild zur späteren Aufnahme unverändert bleibt. Ein auf diese Art erzeugtes Flachfeldbild weist ein beliebiges Signalniveau auf. Da alle Aufnahmen (auch bei der Kalibrierung) grundsätzlich flachfeldkorrigiert werden, ist dies jedoch unerheblich. Die quantitative Schichtdickeninformation bleibt erhalten, da sich das Signalniveau des Flachfeldes herauskürzt. Bei Änderungen am optischen Aufbau kann eine erneute Flachfeldaufnahme notwendig werden, oder die Art der Flachfelderzeugung variiert (Abschnitt 5.3.3). Das Signalniveau der Flachfeldaufnahmen kann somit variieren. Um Aufnahmen, die durch unterschiedliche Flachfelder korrigiert wurden ohne Skalieren miteinander vergleichen zu können, ist eine Normierung des jeweiligen Flachfeldes auf einen Durchschnittswert von eins sinnvoll. Auf diese Weise wird der durchschnittliche Wert der Signalstärke durch die Flachfeldkorrektur nicht verändert. Vorteilhaft ist dies ebenfalls bei der Flachfeldkorrektur der später beschriebenen In-situ-Kalibrierung. Die Kalibrierfaktoren sind durch die Korrektur mit dem normierten Flachfeld stets miteinander vergleichbar. Im Folgenden wird die Berechnung des normierten Flachfelds beschrieben.

Aus dem dunkelbildkorrigiertem Flachfeld-Bild $(F - D)$ wird der Mittelwert des Signals aller Einzelpixel $\overline{m_{(F-D)}}$ ermittelt.

$$\overline{m_{(F-D)}} = \frac{1}{m} \sum_{i,j \in \mathfrak{R}} b_{i,j}(F - D) \quad (37)$$

Mit $(F - D)$: Dunkelkorrigiertes *Flachfeld*, in counts

$\overline{m_{(F-D)}}$: *Mittelwert* aller Bildpunkte aus $(F - D)$, in counts

m: *Anzahl* der Pixel im Bild

Das korrigierte und normierte Bild C erhält man nun durch die Division des dunkelbildkorrigierten Bildes durch das ebenfalls dunkelbildkorrigierte Flachfeld und Multiplikation mit dem Mittelwert aller Bildpunkte desselben.

$$C = \frac{(R - D) \cdot \overline{m_{(F-D)}}}{(F - D)} \quad (38)$$

Mit C : Korrigiertes und normiertes *Bild*, in counts

$(R - D)$: Dunkelkorrigiertes *Rohbild*, in counts

Praktische Umsetzung der Flachfeldkorrektur

Eine korrekte örtliche Zuordnung zwischen Flachfeldbild und (späterer) LIF-Aufnahmen ist unbedingt erforderlich. Um diese zu gewährleisten, wird das Flachfeld im eingebauten Quarzglasring des Tribometers erzeugt. Die Erzeugung einer gleichmäßig dünnen Ölschicht auf der Innenseite des Quarzglasrings gelingt durch eine Silikonform. Die Methode ist in Abbildung 70 dargestellt.

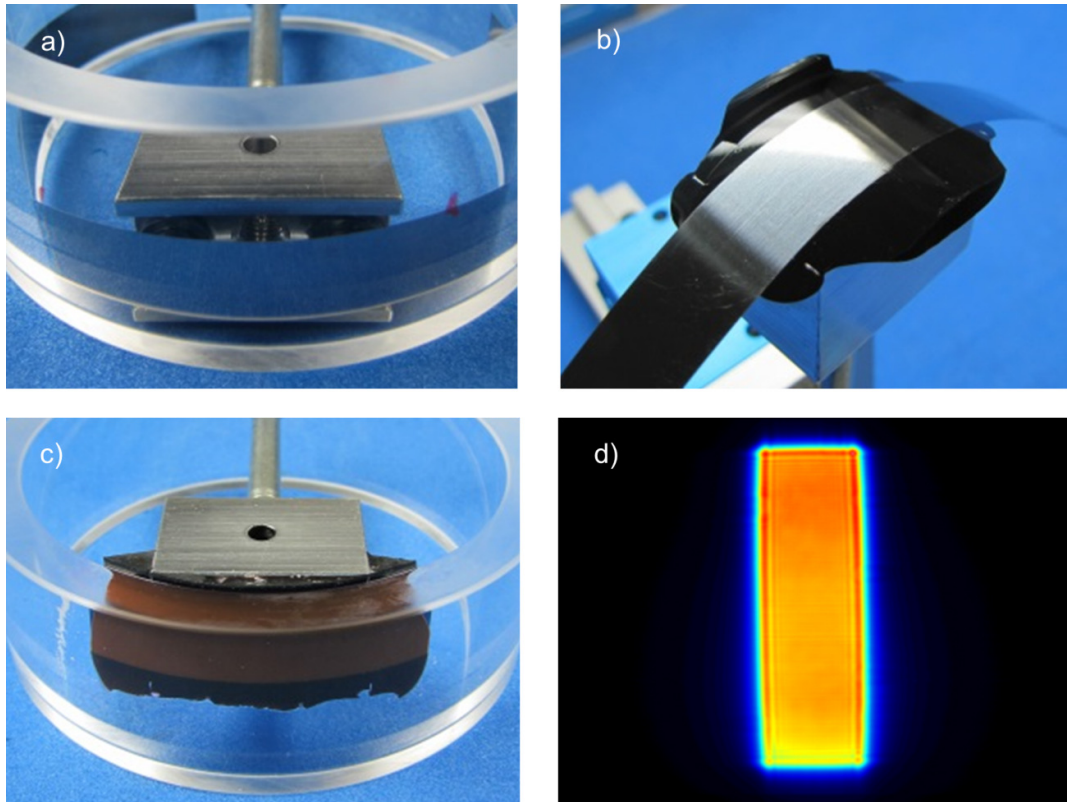


Abbildung 70: Darstellung des Flachfeldes mittels Silikon-Abdruckmasse: a) Platzierung des Präzisionsfolien-Bands und der Gussform im Quarzglasring, b) Entformte Klebevorrichtung mit Präzisionsfolien-Band, c) Mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllter Spalt zwischen Klebevorrichtung und Quarzglasring, d) Aufnahme des Flachfeldes

Im Innern des Quarzglasringes wird ein 40 μm dickes Präzisionsfolienband so befestigt, dass es plan aufliegt. Einige Streifen Klebeband fixieren das Präzisionsfolienband über dem nun eine Gussform aus Aluminium befestigt wird. Mittels einer Schraube lässt sich diese im Quarzglasring verspannen. Über eine Bohrung kann nun eine Silikon-Abdruckmasse in die Gussform eingebracht werden. Sobald diese ausgehärtet ist, wird die Gussform mit dem Präzisionsfolienband aus dem Quarzglasring entfernt. Der Hohlraum, der nach der Entfernung des Präzisionsfolienbandes zurückbleibt, kann nun mit fluoreszenzmarkiertem Öl aufgefüllt werden, wenn die Abguss-Vorrichtung in den im Tribometer verbauten Quarzglasringring eingesetzt wird. Die entstandene Ölschicht mit konstanter Dicke dient zur Erzeugung des Flachfeld-Bildes. Um zu vermeiden, dass

feinste Oberflächenfehler in der Abdruckmasse zu permanenten Unregelmäßigkeiten im Flachfeld führen, wird der Quarzglasring während der Aufnahme des Flachfeldes einige Grad gedreht und die entsprechenden Einzelbilder gemittelt.

Einfluss der Laser-Pulsenergie auf das Flachfeld

Die für die Flachfelderzeugung verwendete schwarze Silikon-Abdruckmasse wird bei der Bestrahlung mit der maximalen Laser-Pulsenergie thermisch beschädigt. Daher muss zur Aufnahme des Flachfeld-Bildes die Laser-Pulsenergie auf etwa 25% reduziert werden. Um die Auswirkungen dieser Methode auf die Wiedergabe der im Versuch benutzten Laser-Intensitätsverteilung bei 100% Pulsenergie zu untersuchen, wurde in der Kalibriervorrichtung ein 15 µm dicker Ölfilm unter Verwendung eines Stahlgegenkörpers erzeugt und mit jeweils 25 und 100% Pulsenergie beleuchtet. Durch Division des 100%-Bildes durch das 25%-Bild werden Unterschiede in der Lichtverteilung sichtbar, siehe Abbildung 71.

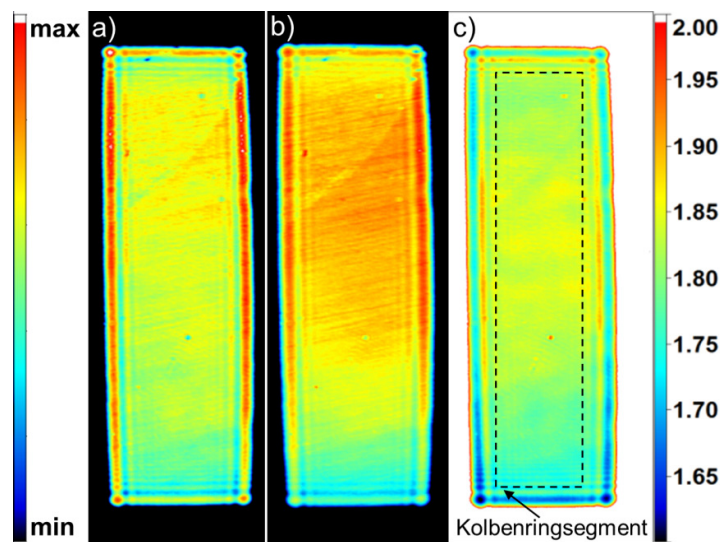


Abbildung 71: Unterschiedliche Intensitätsverteilung zwischen zwei Flachfeldern: a) 25% Laser-Pulsenergie, b) 100% Laser-Pulsenergie, c) Verhältnis aus 100% Pulsenergie zu 25% Pulsenergie

Die Bilder a) und b) sind zur besseren Vergleichbarkeit auf den gleichen Maximalwert skaliert. Bild c) zeigt das Ergebnis der Division des unskalierten Bildes b) durch das unskalierte Bild a). Ein im Durchschnitt um den Faktor 1,8 erhöhtes Signal bei einer Erhöhung der Laser-Pulsenergie von 25 auf 100% deckt sich mit den Erkenntnissen in Abbildung 41. Es zeigt sich, dass durch Variation der Laser-Pulsenergie durch Benutzung des Abschwächers ebenfalls die Lichtverteilung variiert. Im Bereich des Kolbenringsegments werden Werte zwischen 1,75 – 1,85 erreicht, was einer Abweichung vom Mittelwert von 2,8% entspricht. Durch die geringe Intensitätsvariation im Flachfeld, ist die durch die Reduzierung der Pulsenergie bedingte Unsicherheit somit gering.

Kalibrierung der LIF-Messung zur Schichtdickenmessung

Das flachfeldkorrigierte Bild C gibt die Fluoreszenzintensität an der Messstelle unabhängig von der lokalen Laserlicht-Intensitätsverteilung wieder. Um ein Bild der quantitativen Verteilung der Schichtdicke C_{SD} zu erhalten, muss das Bild nun noch durch den Kalibrierfaktor c_{cal} geteilt werden. Dieser stellt den Proportionalitätsfaktor zwischen Fluoreszenzsignal und Schichtdicke dar.

$$C_{SD} = \frac{C}{c_{cal}} = (R - D) \cdot \frac{\overline{m}_{(F-D)}}{(F - D)} \cdot \frac{1}{c_{cal}} \quad (39)$$

Mit C_{SD} : Kalibriertes Bild, in μm

c_{cal} : Kalibrierfaktor, in counts/ μm

Der Proportionalitätsfaktor c_{cal} wird experimentell bestimmt. Da der Kalibrierfaktor aufgrund der Reflexion von Laser- und Fluoreszenzlicht abhängig vom Hintergrundmaterial ist, wird der Kalibrierfaktor unter Verwendung des eingesetzten Kolbenringsegments im Einbauzustand ermittelt (In-situ-Kalibrierung). Dies geschieht auf zwei unterschiedliche Arten. Durch eine definierte Verkipfung des Kolbenringsegments mit Präzisionsfolie wird ein ölgefüllter Spalt erzeugt, dessen Fluoreszenzsignal mit der Spaltgeometrie verglichen werden kann (im Folgenden als „Kalibrierspalt-Methode“ bezeichnet). Alternativ wird die Bauteilgeometrie des Kolbenringsegments in ölgefüllten Bereichen ausgewertet.

Gewinnung des Kalibrierfaktors mit der Kalibrierspalt-Methode

Bei der Kalibrierspalt-Methode wird der ölgefüllte Spalt am Experiment so verändert, dass sich eine Aussage über dessen Geometrie machen lässt. Durch Einschub einer Präzisionsfolie am unteren Ende des Kolbenringsegments, wird eine definierte Verkipfung desselben herbeigeführt. Der dadurch entstandene keilförmige Spalt kann zur Ermittlung des Kalibrierfaktors herangezogen werden. Bei Kolbenringsegmenten mit einem hohen Reflexionsgrad kann es bei der Ermittlung der Kalibrierfaktoren zur Sättigung des Detektors kommen. Aus diesem Grund wurden verschiedene Methoden getestet, dieses zu vermeiden. Abbildung 72 zeigt das Ergebnis der Versuche. Durch Verwendung einer dünneren Folie kann die maximal auftretende Schichtdicke klein gehalten werden. Eine $5\text{ }\mu\text{m}$ dicke Präzisionsfolie ist jedoch im Vergleich zu einer Folie mit $10\text{ }\mu\text{m}$ Dicke aufgrund der geringen Steifigkeit nur mit Mühe zu positionieren. Alternativ wurde das Signal mit Hilfe der Blendeneinstellung (Reduzierung von Blende 4 auf Blende 16) am Kameraobjektiv abgeschwächt. Eine Verstellung der Blende bedingt jedoch die Demontage der Kamerahülle. Hierbei kann die Kameraposition leicht verstellt werden, was eine erneute Flachfeldkorrektur notwendig macht. Ein zusätzlicher Nachteil ist die notwendige Korrektur des Kalibrierfaktors, wenn die Blendeneinstellung von Messung und Kalibrierung abweichen. Die Verdünnung des fluoreszenzmarkierten Öls mit Hilfe eines nicht fluoreszierenden Lösungsmittels (n-Dodecan) stellt eine weitere Möglichkeit dar, das Fluoreszenzsignal abzuschwächen. Bei dieser Methode muss

das Fluoreszenzverhalten der verdünnten Lösung im Vergleich zur unverdünnten Lösung im Vorfeld ermittelt und der Kalibrierfaktor entsprechend skaliert werden.

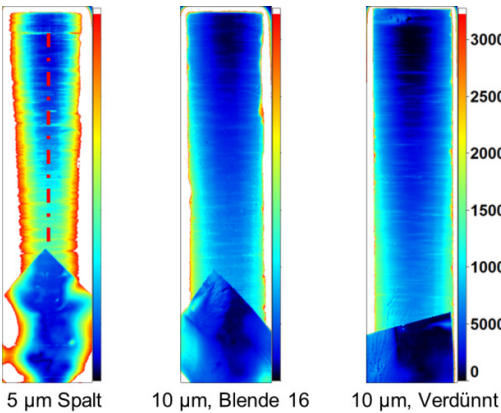


Abbildung 72: Varianten zur Ermittlung des Kalibrierfaktors Einsetzen einer Präzisionsfolie in den Schmierspalt

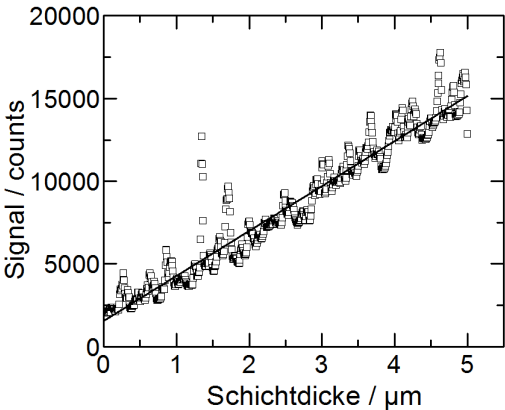


Abbildung 73: Fluoreszenzsignal entlang der rot markierten Linie im Kalibrierspalt mit linearer Ausgleichsgrade

Die Auswertung des Signal-Schichtdicken-Verhältnisses erfolgt unabhängig von der gewählten Abschwächungsmethode entlang der strichpunktierten roten Linie in Abbildung 72. Die Aufnahmen bei der Kalibrierung sind ebenfalls mit dem normierten Flachfeld korrigiert worden. Das Ergebnis zeigt Abbildung 73. Aufgrund von Unebenheiten in der Oberfläche des Kolbenringsegments wird der Zusammenhang zwischen Fluoreszenzsignal und Schichtdicke (Kalibrierfaktor) mittels linearer Regression bestimmt. Nach diesem Verfahren werden auch die übrigen Kalibrierspalte ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Kalibrierfaktoren bei der Verwendung der Kalibrierspalt-Methode

Kalibrierspalt	Rohsignal [counts/µm]	Korrigiertes Signal [counts/µm]
5 µm Spalt, unverdünnt	2721	2721
10 µm Spalt, Blende 16	724	2992
10 µm Spalt, verdünnt auf 27%	744	2755

Alle Verfahren liefern vergleichbare Ergebnisse für den Kalibrierfaktor. Falls es die Sättigungsgrenze der Kamera zulässt, ist die Verwendung von unverdünntem Öl in Kombination mit einer 10 µm dicken Präzisionsfolie zu bevorzugen. Kommt es dabei zu einer Sättigung des Detektors, bietet eine 5 µm dicke Präzisionsfolie einen guten Kompromiss aus Handhabbarkeit und Aufwand. Ist jedoch die Probengeometrie wie in die-

sem Fall sehr gut bekannt, kann auch eine alternative Methode zur Ermittlung des Kalibrierfaktors eingesetzt werden.

Auswertung der Probengeometrie

Eine alternative Methode zur Ermittlung des Kalibrierfaktors auch während der Messung besteht in der Auswertung der bekannten Probengeometrie. Hierzu wird der Signalverlauf längs zum ölfüllten Spalt an der Vorderseite des Kolbenringsegments verwendet. Um den Einfluss von Riefen im Kolbenringsegment zu reduzieren, wird der Mittelwert aus etwa 20 Bildzeilen verwendet (Abbildung 74).

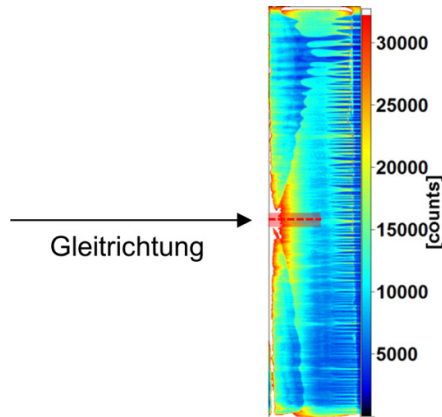


Abbildung 74: Auswertung der Probengeometrie zur Ermittlung des Kalibrierfaktors. Die Ölzufuhr erfolgt in der Mitte

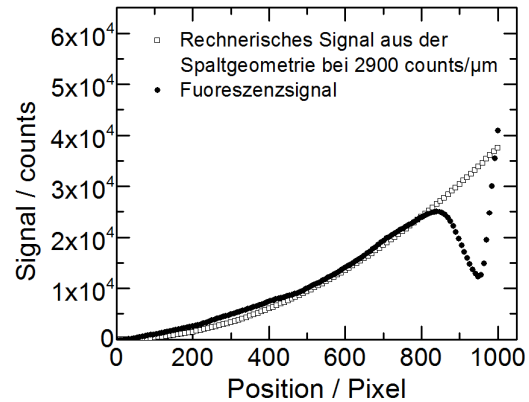


Abbildung 75: Anpassung von Signalverlauf und Bauteilgeometrie

Der Spalt an der Vorderseite des Segments wird als ölfüllt angenommen und dessen Höhe mit einem angenommenen Kalibrierfaktor multipliziert, so dass der Kurvenverlauf mit dem gemessenen Fluoreszenzsignal übereinstimmt. Aufgrund von Öresten in den Rauigkeiten des Kolbenringsegments kann es zu einem Signal-Offset kommen, der abgezogen wird, siehe Abschnitt 4.2.6. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Steigung des Signals und damit den Kalibrierfaktor. Der so ermittelte Kalibrierfaktor liegt bei 2900 counts/μm. Ein besonderer Vorteil diese Methode liegt in der Möglichkeit, die Kalibrierung auch während der Messung durchführen zu können. Nachteilig ist die aufwendige Signalverarbeitung bei der Anpassung von Bauteilkontur und LIF-Signal.

Zur Kalibrierung der LIF-Messung wird das arithmetische Mittel aus den vier gemessenen Kalibriermessungen verwendet. Dieses beträgt 2842 counts/μm.

Pulsenergiekorrektur

Die Puls-zu-Puls-Abweichung der Laserenergie sorgt für Abweichungen bei der Messung. Um diese korrigieren zu können, wird ein Teil des Laserpulses ausgekoppelt und einer Photodiode zugeführt, deren Signal zur Korrektur der Laser-Pulsenergie dient. Bei der Messung am RRV-Kolbenringtribometer kommt es aufgrund der hohen Bestrahlungsstärke zu Sättigungseffekten. Die Abhängigkeit des Signalniveaus von der

Laserenergie ist somit nicht linear (Abbildung 41). Um dies zu kompensieren, wird ein Sättigungsfaktor definiert. Dieser reduziert die Korrektur des Fluoreszenzsignals aufgrund der Pulsenergieschwankungen, da das Fluoreszenzsignal bei hohen Bestrahlungsstärken weniger stark ansteigt als im Bereich geringer Bestrahlungsstärken. Da die Schwankung der Laser-Pulsenergie gering ist, wird der Kurvenverlauf in erster Näherung durch die Signalsteigung bei 100% Pulsenergie, bezogen auf die durchschnittliche Signalsteigung approximiert:

$$c_{sat} = \frac{\left. \frac{dI_{Signal}(E_{Puls})}{dE_{Puls}} \right|_{E_{Puls} = E_{Puls,100\%}}}{\frac{I_{Signal,100\%} - I_{Signal,0\%}}{E_{Puls,100\%}}} \quad (40)$$

c_{sat} : Sättigungsfaktor, einheitenlos

I_{Signal} : Fluoreszenzsignal, in counts

E_{Puls} : Laserpuls-Energie, in Joule

$E_{Puls,100\%}$: 100% Laserpuls-Energie, in Joule

$I_{Signal,x\%}$: Fluoreszenzsignal bei x% Laserpuls-Energie, in counts

Bei den Messungen am RRV-Kolbenringtribometer beträgt der Sättigungsfaktor etwa 0,2. Bei Systemen, an denen Sättigungseffekte eine untergeordnete Rolle spielen, geht der Sättigungsfaktor gegen 1.

Signalverarbeitungskette

Das Rohbild erfährt eine Reihe von Bearbeitungsschritten, um schließlich die Ölfilmhöhe in μm angeben zu können. Die einzelnen Schritte sollen in diesem Abschnitt beschrieben und visualisiert werden. Zuerst werden die Messungen mit dem in Abschnitt 3.1.1 erläuterten Verfahren dunkelkorrigiert. Anschließend erfolgt die Korrektur der Puls-zu-Puls-Abweichung des Lasers und die Flachfeldkorrektur. Zur Messung der Filmstärke wird das Bild mit dem in Abschnitt 5.2.2 gefundenen Kalibrierfaktor skaliert.

$$C_{SD} = (R - D) \cdot \frac{1}{1 - \left(\left(1 - \frac{E_{Puls}}{\langle E_{Puls} \rangle} \right) \cdot c_{sat} \right)} \cdot \frac{\overline{m_{(F-D)}}}{(F - D)} \cdot \frac{1}{c_{cal}} \quad (41)$$

Mit C_{SD} : Kalibriertes Bild, in μm

R : Rohbild, in counts

D : Dunkelbild, in counts

E_{Puls} : Pulsenergie des aktuellen Rohbildes, in Joule

F : Flachfeld, in counts

$\overline{m_{(F-D)}}$: Mittelwert aller Bildpunkte aus $(F - D)$, in counts

c_{cal} : Kalibrierfaktor, in counts/ μm

Abbildung 76 veranschaulicht die Prozesskette anhand von Einzelbildern zwischen den einzelnen Schritten. Die Korrektur der Pulsenergie ist nicht gesondert dargestellt.

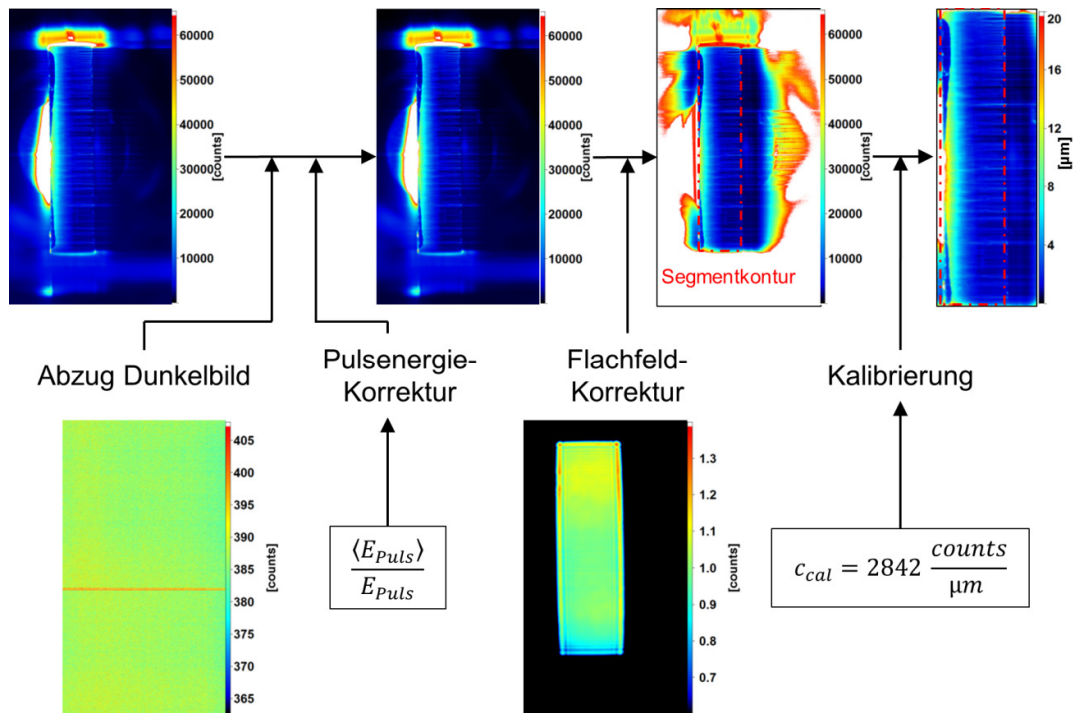


Abbildung 76: Signalverarbeitungskette des Kamerabildes

Nach Abzug der Dunkelbildes und Korrektur der Puls-zu-Puls-Abweichung verändert sich das Bild nicht grundlegend. Das Dunkelbild ist mit etwa 400 counts im Vergleich zum Messsignal mit etwa 20000 counts verhältnismäßig „dunkel“ und die typische Puls-zu-Puls Abweichung beträgt unter 5%. Die Flachfeldkorrektur verändert das Gesamtbild deutlich, da nicht direkt beleuchtete Bereiche außerhalb des Kolbenringsegments durch Werte nahe Null dividiert werden. Diese Bereiche sind daher nicht auswertbar und werden aus dem Bildbereich entfernt. Durch die Division mit dem Kalibrierfaktor wird das Bild auf die Filmdicke in μm skaliert. Der beleuchtete Bereich geht am hinteren Ende des Kolbenringsegments etwas über die Segmentkontur hinaus. Dadurch kann das Verhalten des Ölfilms (Streifenmuster) beim Verlassen des Segmentbereichs und darüber hinaus beobachtet werden. Die Kalibrierung gilt aufgrund der verschiedenen Reflexionseigenschaften allerdings nur im Bereich des Segments.

5.2.3 Abschätzung der Messgenauigkeit

Wie jedes Messsystem unterliegt auch die Filmdickenmessung mittel LIF einer Unsicherheit des Messwertes. Es sind zwei Arten von Messunsicherheiten zu unterscheiden. Bei Vorliegen einer statistischen Unsicherheit streut der Messwert um einen Mittelwert. Durch häufiges Wiederholen der Messung kann diese Art der Messunsicherheit reduziert werden. Systematische Unsicherheiten hingegen zeigen eine stete Abweichung, die sich nicht durch häufiges Wiederholen reduziert lässt. Die Messunsicherheit Δx wird zusammen mit dem Messergebnis x angegeben. Die Form entspricht „($x \pm \Delta x$) Einheit“. Die Messunsicherheit wird aus der Standardabweichung σ_x und der Anzahl der Messwerte n bestimmt.

$$\Delta x = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sigma_x \quad (42)$$

Mit: Δx : *Messunsicherheit*

N : *Anzahl der Messungen*

σ_x : *Standardabweichung*

Statistische Unsicherheit

Der Detektor weist abgesehen von einem konstanten Anteil, der durch die mittlere Dunkelbildkorrektur beseitigt wird, im Dunkelbild eine statistische Signalkomponente auf. Ebenso ist das Strahlprofil des Lasers von Puls zu Puls leicht verschieden. Durch Subtraktion des jeweiligen Durchschnittsbildes von den Einzelbildern erhält man ein Bild dieser statistischen Abweichung (Varianz), siehe Abbildung 77 und Abbildung 78.

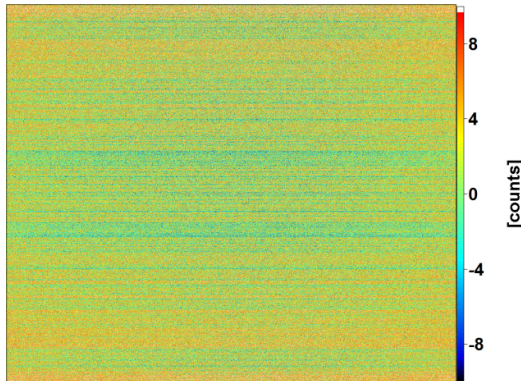


Abbildung 77: Statistische Abweichung vom Mittelwert des Dunkelbilds

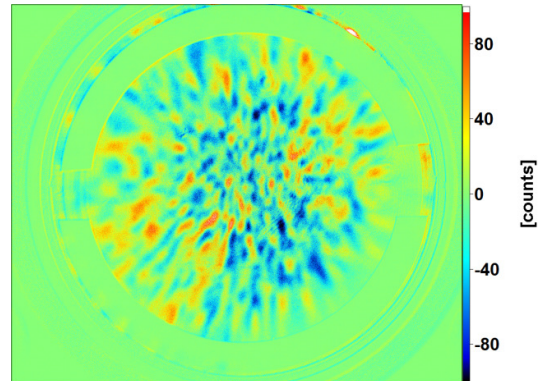


Abbildung 78: Statistische Abweichung vom Mittelwert der Laser-Intensitätsverteilung

Das Dunkelrauschen des Detektors weist eine Standardabweichung von etwa 9 counts auf, siehe Abbildung 77. Dies entspricht dem Signal einer Ölfilmstärke von 3 nm und einem Dynamikumfang von 1:7300. Die Standardabweichung des Signals durch die Variation der Laser-Intensitätsverteilung beträgt etwa 37 counts, siehe Abbildung 78. Dies entspricht 0,4% des durchschnittlichen Signals von 9500 counts während der Mes-

sung in der Kalibriervorrichtung. Diese Messunsicherheit verringert sich bei der Mittelung von 100 Bildern um den Faktor $\sqrt{100} = 10$.

Der Kalibrierfaktor unterliegt ebenfalls einer statistischen Messunsicherheit. Aufgrund der geringen Anzahl von Messpunkten ergibt sich für den Kalibrierfaktor ein Wert von (2842 ± 126) counts/ μm .

Systematische Unsicherheit

Bei der Berücksichtigung des Flachfelds kommt es durch die abweichende Pulsenergie während der Flachfeldaufnahme und der Messung zu einer systematischen Messunsicherheit von $\pm 2.8\%$, siehe Abschnitt 5.2.2.

Fehlerfortpflanzung und Gesamtunsicherheit

Unter der Annahme, dass die oben genannten Unsicherheiten normalverteilt sind, ergibt sich die Gesamtunsicherheit der Schichtdicke bei einer Einzelmessung zu:

$$\Delta \bar{s} = \sqrt{\Delta \bar{d}s^2 + \Delta \bar{l}^2 + \Delta \bar{c}^2 + \Delta \bar{f}f^2} = 5,3\% \quad (43)$$

Mit $\Delta \bar{s}$: *Messunsicherheit bei der Schichtdickenmessung*

$\Delta \bar{d}s$: *Statistische Unsicherheit des Dunkelstroms*

$\Delta \bar{l}$: *Statistische Unsicherheit in der Laser-Intensitätsverteilung*

$\Delta \bar{c}$: *Statistische Unsicherheit der Bestimmung des Kalibrierfaktors*

$\Delta \bar{f}f$: *Systematische Unsicherheit bei der Flachfeldkorrektur*

Somit kann unter den gegebenen Bedingungen die Filmdicke für ein Einzelbild auf etwa 5% genau bestimmt werden. Dies entspricht bei einer durchschnittlichen Schichtdicke von $2 \mu\text{m}$ einer Messunsicherheit von $0,1 \mu\text{m}$. Die größte Einzelunsicherheit ist dabei der Kalibrierfaktor mit einer Unsicherheit von 4,4%.

5.2.4 Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen mit dem phasengekoppelten System am RRV-Kolbenringtribometer vor. Die Versuchsergebnisse werden in Form von kalibrierten Einzelbildern präsentiert, aus denen die minimale Ölfilmdicke im Schmierpalt extrahiert und zusammen mit den jeweiligen Stribeckkurven dargestellt wird. Abbildung 79 zeigt das Sichtfeld bei der Messung und den Auswertebereich der Ölfilmdicke.

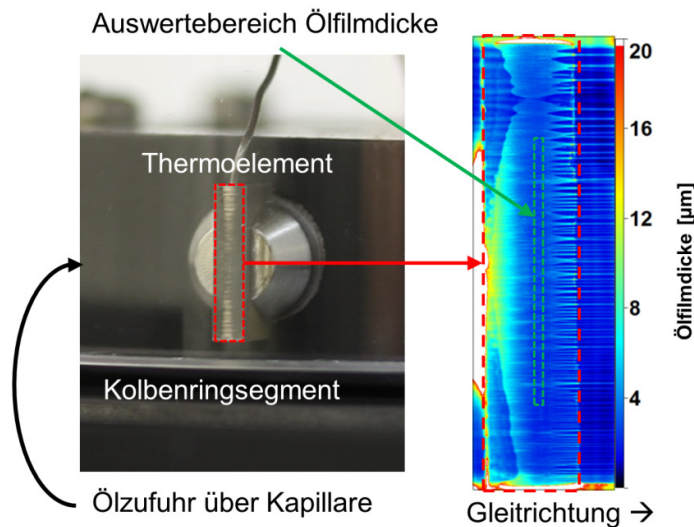
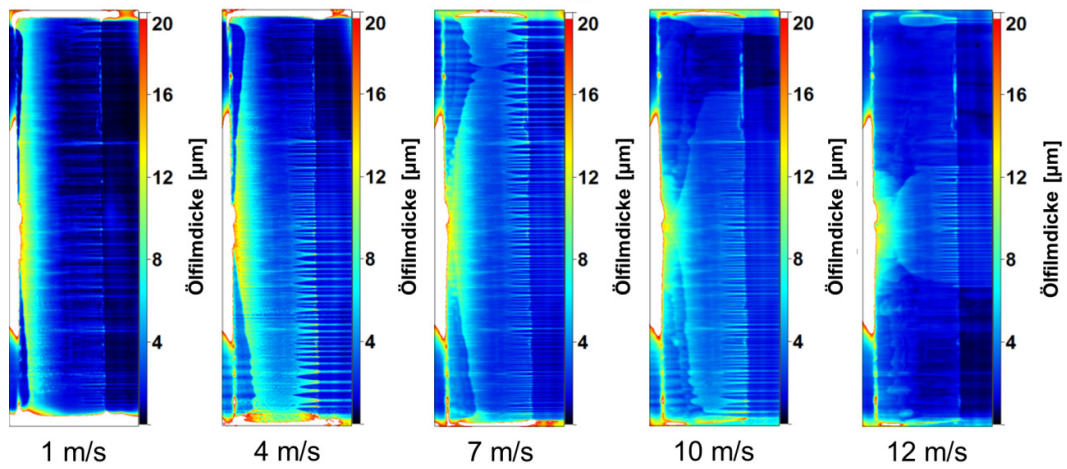


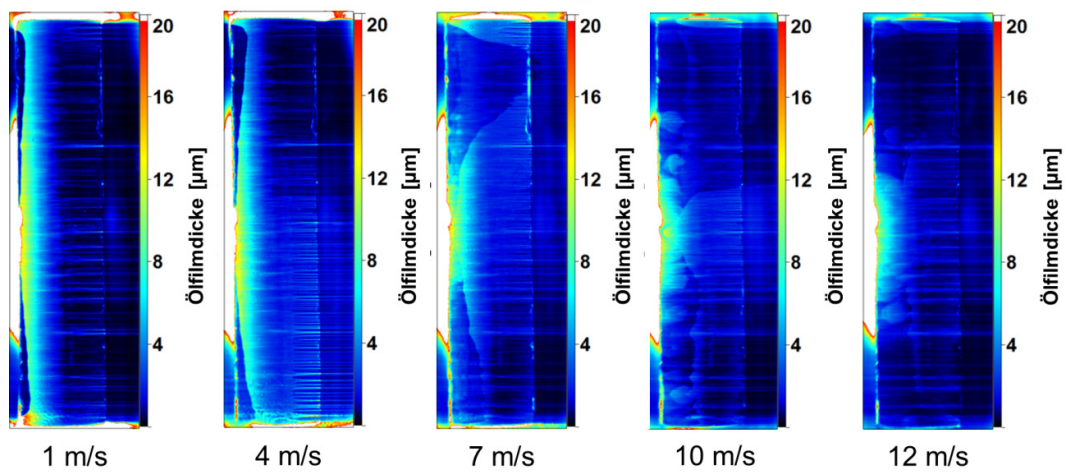
Abbildung 79: Erläuterungen zum Sichtfeld

Durch den Quarzglaszylinder ist das Kolbenringsegment in der Draufsicht zu sehen. Im Betrieb wird so der Ölfilm zwischen Kolbenringsegment und Zylinderwand sichtbar. Durch die Aufnahme des Kolbenringsegments über den 90° Ablenkspiegel erscheint die Gleitrichtung von links nach rechts. Dementsprechend tritt das über die Kapillare an der Zylinderwand abgestreifte Schmieröl scheinbar von links in den Schmierpalt ein. Dort verteilt es sich bogenförmig im Spalt und benetzt Kolbenringsegment und Zylinderwand. An der Austrittsseite verlässt das Öl den Spalt und hinterlässt dabei ein Streifenmuster auf der Zylinderlaufbahn, das auch außerhalb des Schmierpalts bestehen bleibt. Durch die ballige Form des Kolbenrings ist der Schmierpalt etwa in der Mitte des Segments am geringsten, weshalb an dieser Stelle die repräsentative Ölfilmdicke bestimmt wird (grün markierter Bereich). Mit dem phasengekoppelten Messsystem wurden vier Messreihen mit den Versuchsölen A und B, sowie polierten und unpolierten Kolbenringsegmenten aufgenommen. Die Ölzufuhr betrug dabei konstant $0,2 \text{ mm}^3$ pro Umdrehung über eine auf der Innenseite des Quarzglaszylinders streifende Kapillare. Die Normalkraft auf das Ringsegment wurde in den Abstufungen 10, 25 und 50 N variiert. Die Segmenttemperatur betrug konstant 80°C , die maximale Gleitgeschwindigkeit 12 m/s . Einzelbilder aus den vier Messreihen sind in Abbildung 80–83 dargestellt.

Nitrierter Kolbenring, Öl A, 10 N



Nitrierter Kolbenring, Öl A, 25 N



Nitrierter Kolbenring, Öl A, 50 N

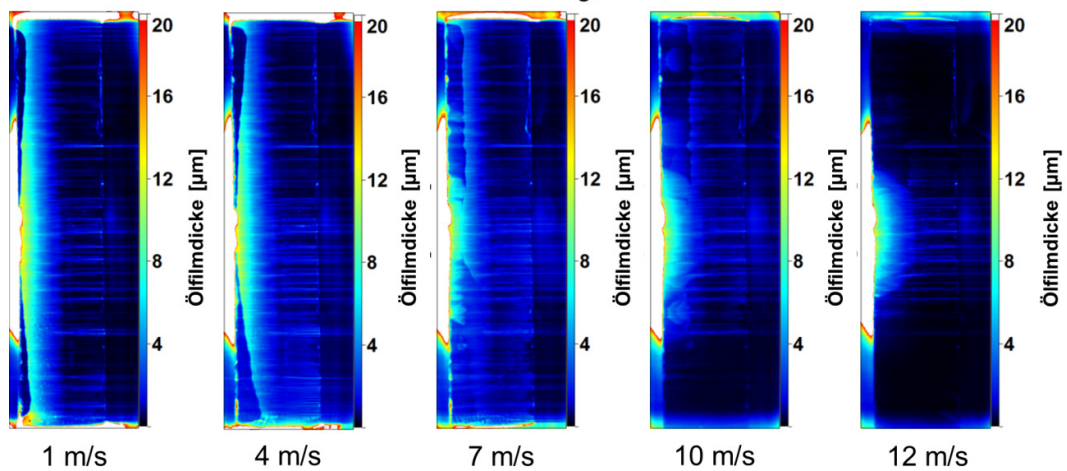
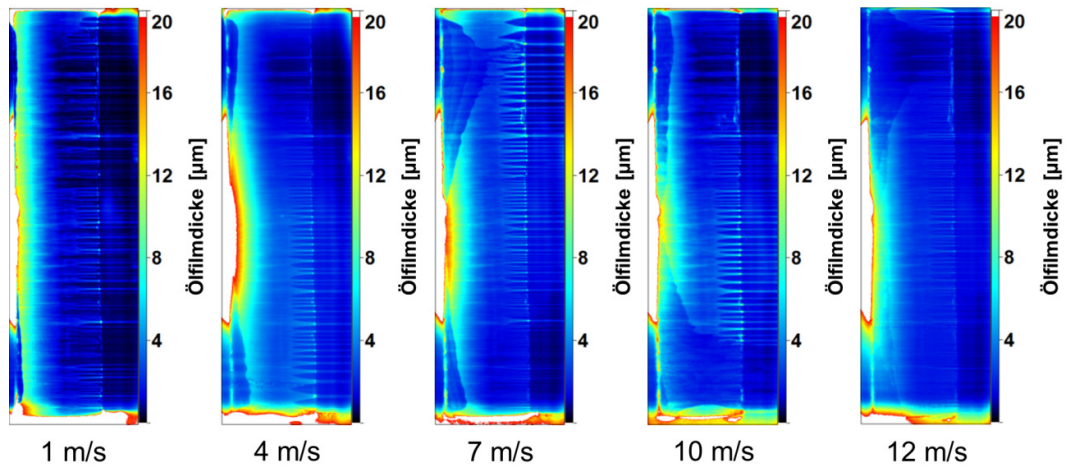
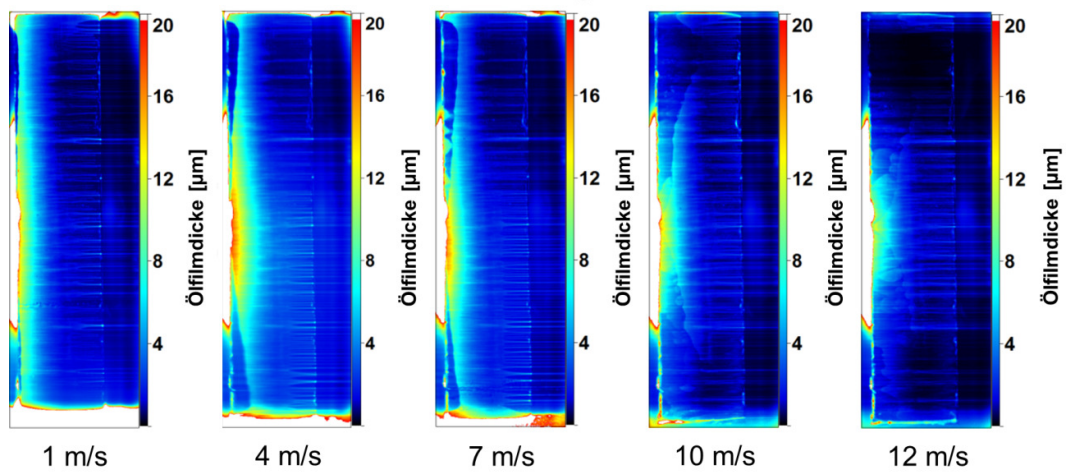


Abbildung 80: Messreihe 1, nitrierter Kolbenring, Öl A

Nitrierter Kolbenring, Öl B, 10 N



Nitrierter Kolbenring, Öl B, 25 N



Nitrierter Kolbenring, Öl B, 50 N

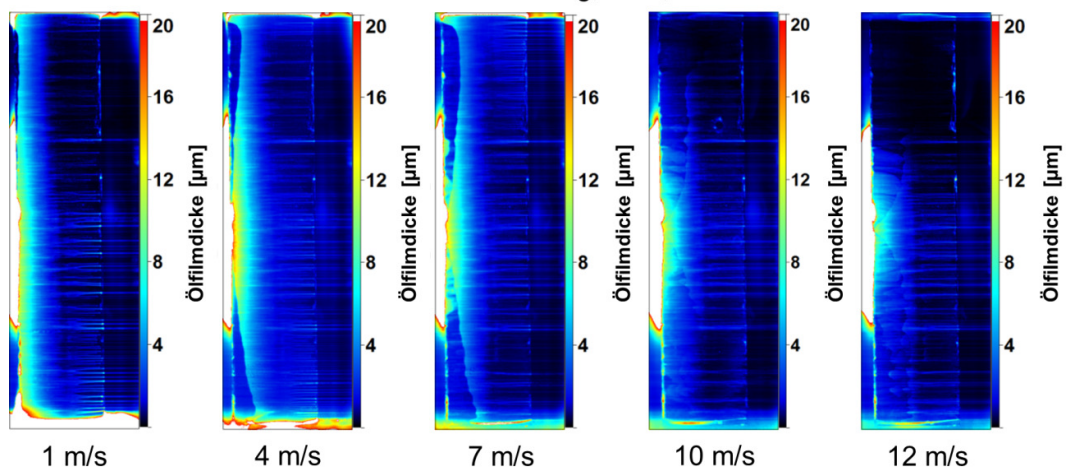
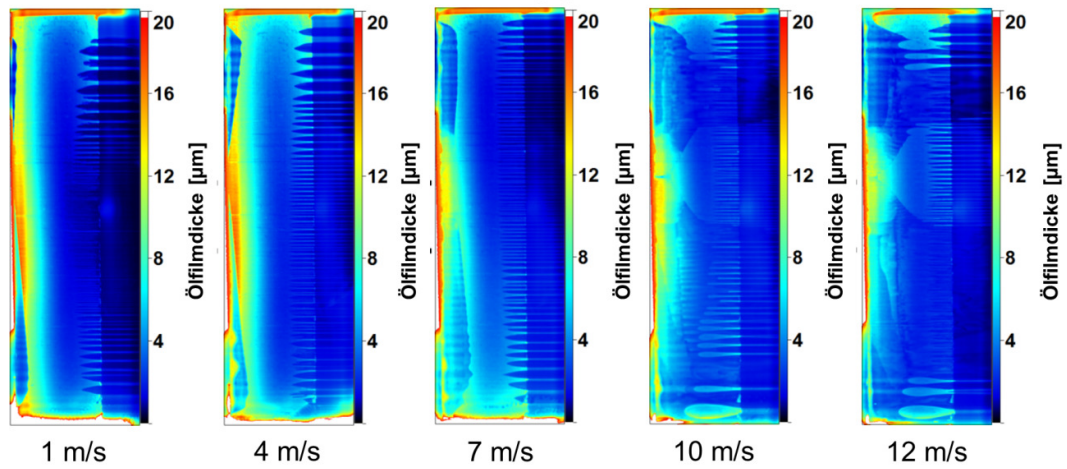
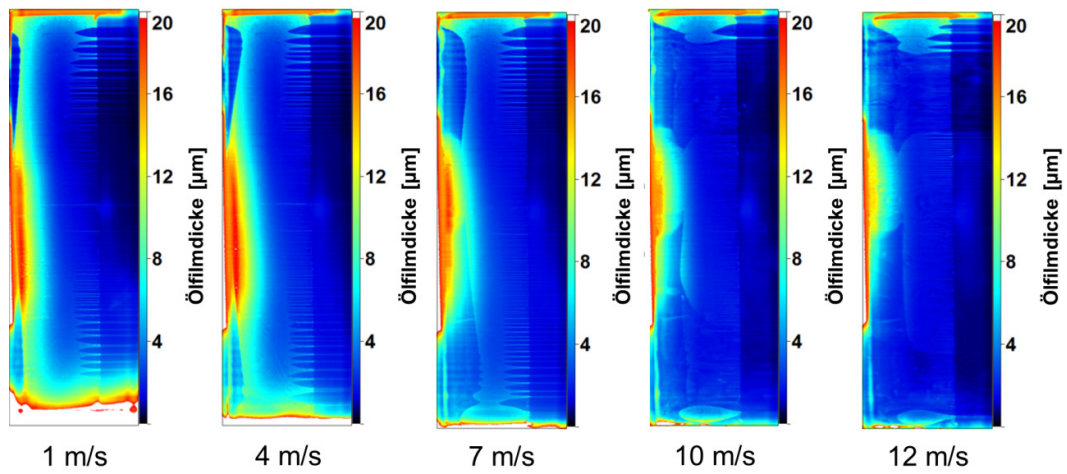


Abbildung 81: Messreihe 2, nitrierter Kolbenring, Öl B

Nitrierter Kolbenring, poliert, Öl A, 10 N



Nitrierter Kolbenring, poliert, Öl A, 25 N



Nitrierter Kolbenring, poliert, Öl A, 50 N

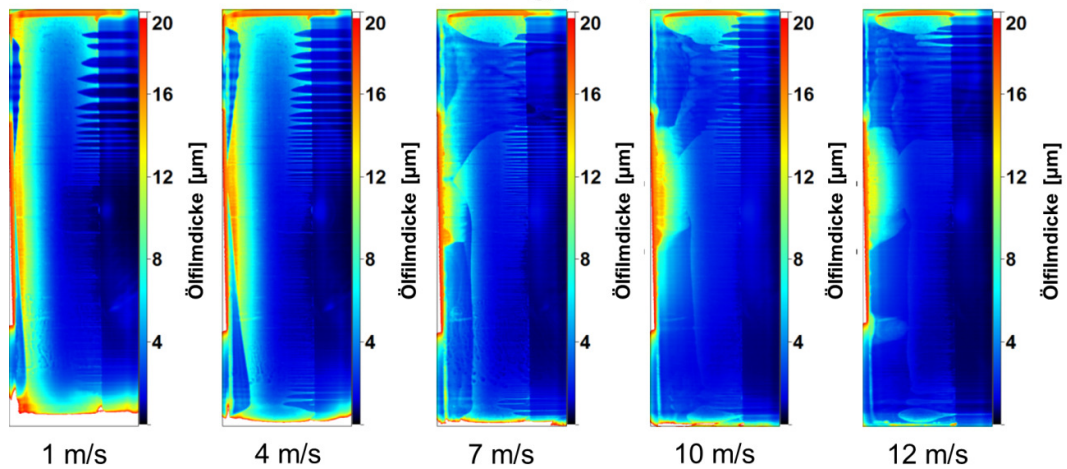
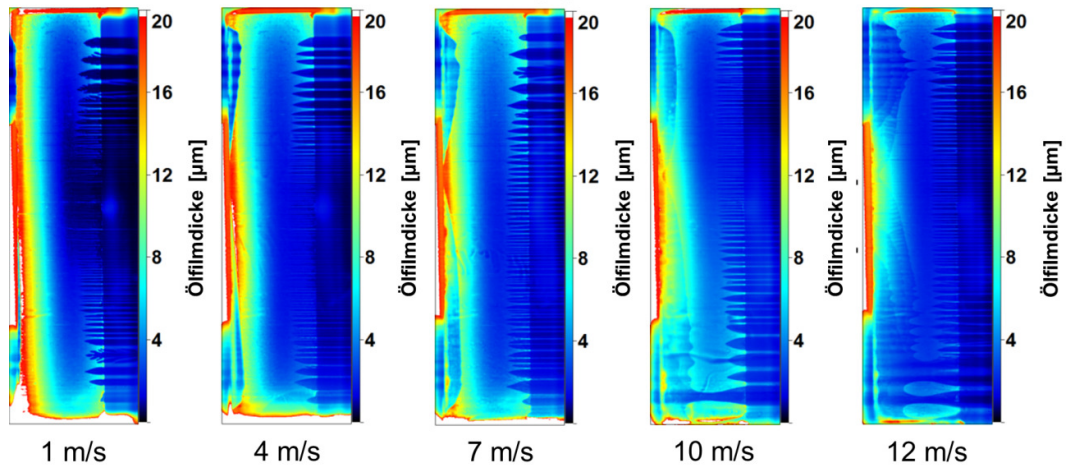
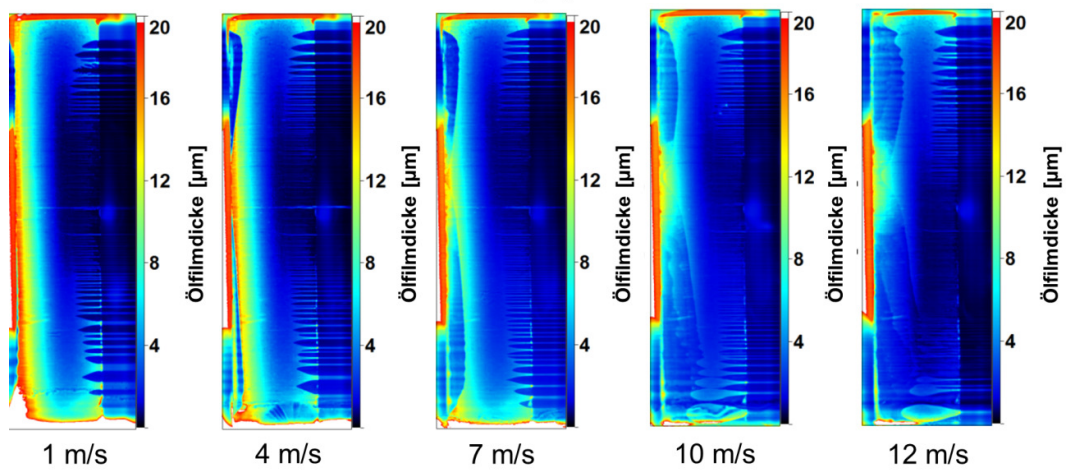


Abbildung 82: Messreihe 3, nitrierter Kolbenring, poliert, Öl A

Nitrierter Kolbenring, poliert, Öl B, 10 N



Nitrierter Kolbenring, poliert, Öl B, 25 N



Nitrierter Kolbenring, poliert, Öl B, 50 N

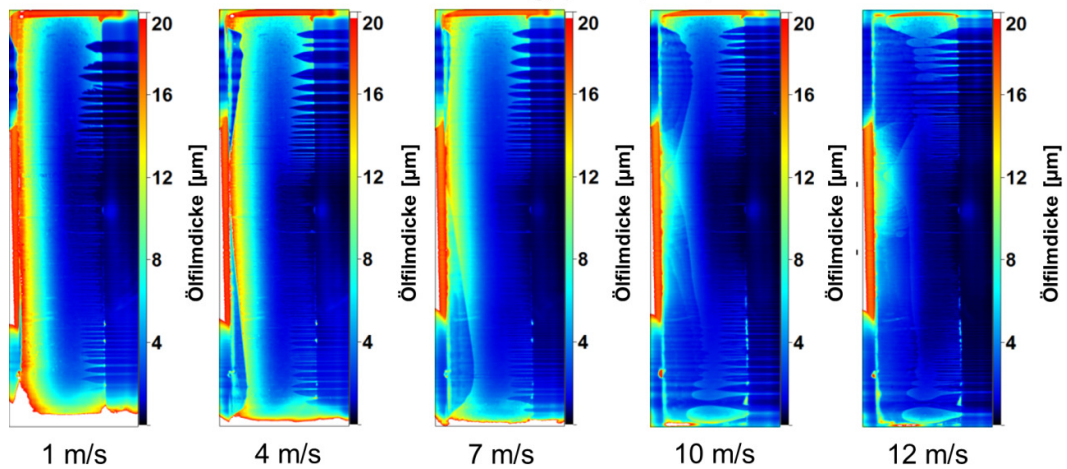


Abbildung 83: Messreihe 4, nitrierter Kolbenring, poliert, Öl B

Die von Grice und Sherrington [83] sowie von Shin et. al. [87] vermutete Teilfüllung des Schmierspalts bei höheren Gleitgeschwindigkeiten konnte bestätigt werden. Steigende Gleitgeschwindigkeiten und eine verringerte Ölfilmdicke aufgrund steigender Normalkraft führen zu einer erhöhten Scherung des Ölfilms. Die Bogenform des ölbenetzten Bereichs an der Vorderseite des Segments nimmt stetig zu und im Bereich von 7-10 m/s wird der Ölfilm schließlich instabil und reißt am Scheitelpunkt der Bogenform im Bereich des engsten Schmierspalts immer wieder ab. Durch die phasengekoppelte Aufnahme des Ölfilmverhaltens kann jedoch keine Aussage über die Frequenz dieser Instabilitäten gemacht werden. Der Vergleich der beiden Ölsorten zeigt, dass das niedrigviskose Versuchsöl B im Vergleich zum höherviskosen Versuchsöl A eher in der Lage ist, den Schmierspalt auszufüllen, was das Einsetzen der Instabilitäten hin zu höheren Gleitgeschwindigkeiten verschiebt.

Der polierte Kolbenring weist aufgrund der händischen Politur eine Balligkeit entlang der Lauffläche auf und liegt daher nicht flächig auf der Laufbahnoberfläche an. Aus diesem Grund zeigen sich an der Ober- und Unterseite des Kolbenringsegments deutlich größere Filmdicken. Die Breite der Streifenmuster beim polierten Kolbenringsegment scheinen mit der Filmdicke entlang der Mittellinie des Kolbenringsegments zu korrelieren. Große Filmdicken an den Rändern des Segments resultieren in einem grob gefächerten Streifenmuster. Der bereits bei den Versuchen mit den nicht polierten Kolbenringsegmenten gefundene Einfluss bestätigt sich in besonders ausgeprägter Form bei den Versuchen mit den polierten Kolbenringsegmenten. Das dünnflüssigere Versuchsöl B zeigt ein wesentlich stabileres Ölfilmverhalten.

Um den Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf den Verlauf der Ölfilmdicke genauer untersuchen zu können, wurde die durchschnittliche Ölfilmdicke auf einer 10 Pixel breiten Linie entlang der Mittellinie des Segments im Bereich der geringsten Ölfilmdicken ausgewertet (Abbildung 79). Dazu wurde der Mittelwert aus 90 Einzelmessungen, die an drei verschiedenen Winkelpositionen des Quarzglasrings (0, 120 und 240°) aufgenommen wurden, ermittelt. Die Randbereiche an der Ober- und Unterseite des Segments wurden dabei nicht mit einbezogen. Das Segmentende unterbricht hier den hydrodynamischen Druckaufbau mit entsprechender Beeinflussung des Ölfilmverhaltens. Bei Verwendung des polierten Kolbenringsegments führt die ausgeprägte Balligkeit im Randbereich des Segments zu unrealistisch große Filmdicken. Die Ergebnisse sind in Abbildung 84-87 zusätzlich zum Verlauf der Reibkoeffizienten dargestellt. Die gemessenen Ölfilmdicken im Bereich von 0,5–3,5 μm decken sich mit den Ergebnissen von Inagaki [70] und Hoult et al. [64], die ebenfalls mit der laserinduzierten Fluoreszenz arbeiten und etwa 2 μm als Ölfilmdicke zwischen Kolbenring und Zylinderwand an optisch zugänglichen Motoren angeben.

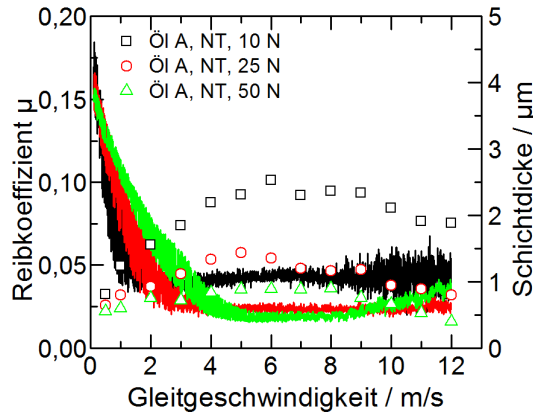


Abbildung 84: Stribeckkurven der Messreihe 1 inklusive Ölfilmdicken

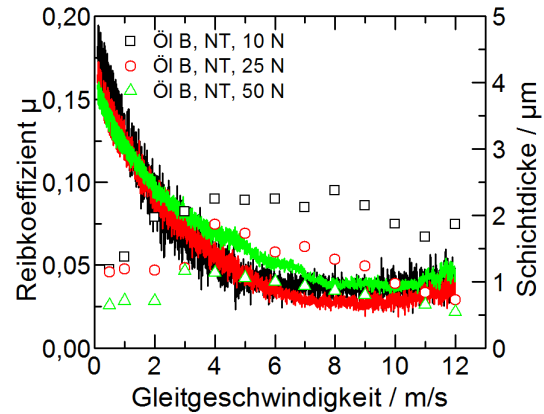


Abbildung 85: Stribeckkurven der Messreihe 2 inklusive Ölfilmdicken

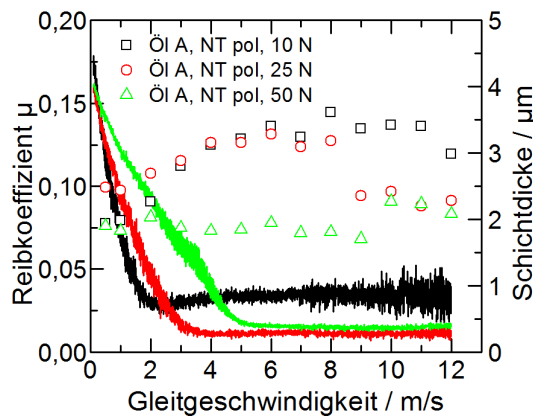


Abbildung 86: Stribeckkurven der Messreihe 3 inklusive Ölfilmdicken

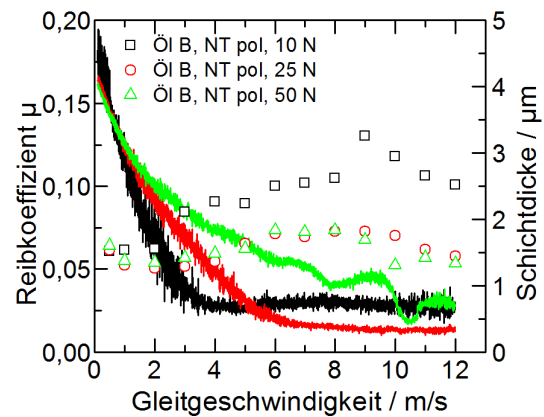


Abbildung 87: Stribeckkurven der Messreihe 4 inklusive Ölfilmdicken

Abbildung 84 zeigt die Ergebnisse der Messreihe 1. Es wurde ein nitrierter Kolbenring in Kombination mit dem Versuchsöl A untersucht. Bei ansteigender Gleitgeschwindigkeit ist der Übergang von der Grenz- in die Mischreibung gut zu beobachten. Der Reibkoeffizient aller Messungen sinkt erheblich, gleichzeitig erhöht sich die Ölfilmdicke. Eine direkte Korrelation zwischen Reibkoeffizient und Ölfilmdicke besteht nicht, mit steigender Normalkraft verringert sich die Ölfilmdicke. Alle Messungen weisen bei Gleitgeschwindigkeiten nahe 0 m/s eine minimale Ölfilmdicke im Bereich von 0,5-1 μm auf. Bei etwa 5-6 m/s erreicht die Ölfilmdicke ihr jeweiliges Maximum.

Im Vergleich dazu weist Versuchsreihe 2 (Abbildung 85) unter Verwendung des niedrigviskoserens Versuchsöls B eine deutliche Veränderung der jeweiligen Verläufe der Reibkoeffizienten auf. Bei der Analyse der Ergebnisse von Messreihe 2 müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden.

Nach Gümbel [108] sind Betriebspunkte mit identischem Schmierungsparameter untereinander vergleichbar. Der Schmierungsparameter wird aus dem Produkt der Gleitgeschwindigkeit und Viskosität dividiert durch die Normalkraft ($\frac{v \cdot \mu}{F_N}$) gebildet. Die Viskosität der Versuchsöle A und B unterscheidet sich etwa um den Faktor 2,5. Bei gleicher Normalkraft ist bei den Versuchen mit Öl B (Messreihe 2) im Vergleich zu den Versuchen mit Öl A (Messreihe 1) somit die 2,5-fache Gleitgeschwindigkeit heranzuziehen (Beispiel: Messreihe 1: 4 m/s zu Messreihe 2: 10 m/s). Der Übergang von der Misch- in die Flüssigkeitsreibung findet somit bei den Versuchen mit Öl A von 0–4 m/s statt. Bei den Versuchen mit Öl B erstreckt sich der Bereich von 0–10 m/s. Der Übergang vom stabilen in den instabilen Schmierfilmbereich bei etwa 8 m/s ist den Ergebnissen jedoch überlagert. Der Anstieg der Ölfilmdicke bei Messreihe 2 ist weniger stetig. Der aus Messreihe 1 abgeleitete zu erwartende Anstieg der Filmdicke bis über 12 m/s findet nicht statt, da der Schmierfilm zuvor instabil wird.

Messreihe 1 zeigt eine Staffelung der Reibkoeffizienten über die Normalkraft. Im Bereich der Mischreibung sinkt der Reibkoeffizient mit steigender Normalkraft, im Bereich der Flüssigkeitsreibung kehrt sich dieser Trend um. Messreihe 2 zeigt diese Staffelung nicht. Der Ausklinkpunkt liegt hier jedoch bereits im instabilen Schmierfilmbereich, was bei weiter zunehmender Gleitgeschwindigkeit zu einem deutlichen Anstieg der Reibkoeffizienten aufgrund von Mangelschmierung führt. Bei den Messungen mit den polierten Kolbenringsegmenten zeigt Messreihe 3 (Abbildung 86) unter Verwendung des viskoserer Versuchsöl A vergleichsweise hohe Filmdicken. Ausgehend von etwa 2 µm bei geringer Gleitgeschwindigkeit steigen die Filmdicken bei 25 und 50 N Normalkraft in fast gleicher Weise an. Entsprechend dazu sinkt der Reibkoeffizient bei diesen Messreihen rasch ab und erreicht minimale Werte von $\mu = 0,01$. Die Messung bei 50 N verhält sich anders. Die Ölfilmdicke steigt anfangs kaum an. Entsprechend lange bleibt der Reibkoeffizient auf einem erhöhten Niveau.

Oberhalb von 9 m/s steigt die Filmdicke schlagartig um etwa 0,5 µm. Die Messung mit 25 N Normalkraft zeigt an dieser Stelle eine deutliche Verringerung der Ölfilmdicke. Dieser Effekt scheint mit dem Beginn der Instabilität des Ölfilms zu korrelieren. Die Messreihe 4 (Abbildung 87), die unter Verwendung eines polierten Kolbenringsegments und dem niedrigviskosen Versuchsöl B entstanden ist, korreliert aufgrund des stabileren Ölfilmverhaltens gut mit der Schmierungsparametertheorie nach Gümbel. Der Bereich von 0–10 m/s deckt sich weitestgehend mit dem Bereich von 0–4 m/s bei der Verwendung von Versuchsöl A. Einzig die Messungen mit 25 N Normalkraft weicht ab. Die Versuche zeigen, dass die Schmierölviskosität auf die im Betrieb vorherrschenden Oberflächenrauigkeiten, Gleitgeschwindigkeiten und Normalkräfte abgestimmt werden muss. Nur so kann ein günstiges tribologisches Verhalten des Ölfilms im Schmierpalt erreicht werden. Die Unstabilitäten des Schmierfilms bei höheren Gleitgeschwindigkeiten haben einen großen Einfluss auf das Reibverhalten des tribo-

logischen Systems. Die Weiterentwicklung der Messtechnik soll helfen, das Schmierfilmverhalten in diesem Bereich besser zu verstehen.

5.3 Weiterentwicklung der Messtechnik zur Hochgeschwindigkeitsmessung

Das bisherige optische Messsystem arbeitet phasengekoppelt und ist in der Lage, ein Bild pro Tribometerumdrehung aufzunehmen. Die hohe Dynamik des Schmierfilmverhaltens bei höheren Gleitgeschwindigkeiten erfordert eine zeitlich hoch aufgelöste Messung. Aus diesem Grund wurde basierend auf den Erfahrungen mit dem phasengekoppelten Messsystem ein Hochgeschwindigkeits-Messsystem aufgebaut.

5.3.1 Auswahl der optischen Komponenten

Laser

Um die etablierte Farbstoffmischung weiterhin nutzen zu können, wurde ein Laser gewählt, dessen Emissionswellenlänge ebenfalls im Wellenlängenbereich um 532 nm liegt, und zwar ein frequenzverdoppelter, diodengepumpter Nd:YLF-Laser mit 527 nm Emissionswellenlänge (Litron LDY303HE). Der Laser ist in der Lage, Repetitionsraten von 0,2 – 20 kHz darzustellen. Die Pulsenergie bei 1 kHz beträgt 22,5 mJ und nimmt mit steigender Repetitionsrate umgekehrt proportional zu dieser ab. Bei 10 kHz beträgt die Pulsenergie entsprechend etwa 2,25 mJ. Bei einer Pulslänge von etwa 150 ns ergibt sich eine Pulsspitzenleistung von 0,15 MW bei 1 kHz Repetitionsrate. Die Strahlform des diodengepumpten Lasers ist oval, mit ebenfalls etwa gaußförmiger Intensitätsverteilung in x- und y-Richtung. Die Pulsleistung des Lasers kann durch Einstellung des Pumpdiodenstroms variiert werden. Eine Monitordiode ermöglicht die Erfassung der Puls-zu-Puls-Abweichung.

Kamera

Für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen kommt wie am phasengekoppelten System eine CMOS-Kamera zum Einsatz, die jedoch höhere Bildwiederholraten ermöglicht (Vision Research Phantom v611). Die maximalen Auflösung beträgt 1280×800 Pixel, die Pixelgröße 20×20 µm². Der A/D-Wandler der CMOS Kamera arbeitet mit 12 bit Auflösung, dabei beträgt die maximale Datendurchsatzrate 6 Gigapixel/s. Somit ist bei der maximalen Auflösung eine Bildwiederholrate von 6242 Bildern pro Sekunde möglich. Bei reduzierter Auflösung steigt die Bildwiederholrate bis auf 680 000 Bilder pro Sekunde bei einem Bildausschnitt von 128×8 Pixel. Die minimale Belichtungszeit der Kamera beträgt 1 µs. Die Kamera wird ebenfalls mit dem bekannten Makroobjektiv mit 200 mm Brennweite und einer maximalen Blendenzahl von f/4 ausgestattet (Nikon AF Micro Nikkor 200 mm), das jedoch ein anderes optisches Filter erhält. Das 10×2 mm² große Kolbenringsegment wird so auf etwa 100×500 Pixel des Kamerasensors projiziert. Die daraus resultierende projizierte Pixelgröße beträgt 20×20 µm². Im Vergleich

zur bisher eingesetzten Kamera bietet die Phantom v611 eine deutlich gesteigerte Bildwiederholrate, weist jedoch eine geringere Auflösung und einen geringeren Dynamikumfang auf.

Optisches Filter

Beim Hochgeschwindigkeits-Messsystem steht deutlich weniger Laserpulsenergie zur Verfügung. Die Pulsenergie des am Hochgeschwindigkeits-Messsystem eingesetzten Laser beträgt bei 10 kHz Bildwiederholrate mit etwa 0,23 mJ nur 2,5% der Pulsenergie, als beim phasengekoppelten System zur Verfügung steht (100 mJ).

Das am phasengekoppelten System eingesetzte schmalbandige Filter lässt nur einen kleinen Teil des Fluoreszenzlichts für die Detektion passieren. Dies ist Voraussetzung für die verwendete Kompensationsstrategie der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenzintensität durch Reabsorption. Um ausreichend Licht für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Verfügung zu haben, wird ein Langpassfilter mit 532 nm Kantenwellenlänge eingesetzt. Dieses erlaubt die Transmission eines Großteils des Fluoreszenzspektrums und maximiert somit die Lichtmenge am Detektor. Die Kompensation der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz wird damit zu Gunsten der Signalstärke aufgegeben.

Timing und Signalverarbeitung

Wie beim phasengekoppelten System kommt ein Steuerrechner der Firma LaVision mit einem sogenannten „Highspeed Controller“ zur Ansteuerung von Laser und Kamera zum Einsatz. Auch auf diesem System läuft die Auswerte- und Steuersoftware DaVis 8.

5.3.2 Applikation der Messtechnik am RRV-Kolbenringtribometer

Der grundsätzliche Aufbau des Hochgeschwindigkeits-Messsystems am RRV-Kolbenringtribometer ist vergleichbar mit dem Aufbau des phasengekoppelten Systems (Abbildung 88). Der Laserstrahl wird ebenfalls durch einen Laserlicht-Führungsarm in das Tribometer geleitet. Durch das ovale Strahlprofil ergeben sich jedoch Änderungen in der Strahlkonditionierung. Die Hochgeschwindigkeitskamera ist deutlich größer und schwerer als die Kamera des phasengekoppelten Systems. Daher kommen eine andere Kamera-Schutzhülle und eine verstärkte Kamera-Halterung zum Einsatz. Aufgrund des erhöhten Kühlluftbedarfs wurde zudem eine verbesserte Druckluftversorgung der Kamera-Schutzhülle vorgesehen.

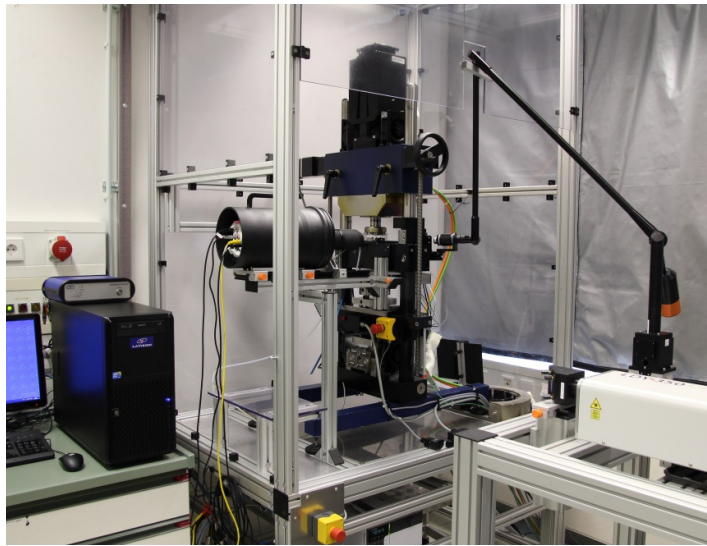


Abbildung 88: Applikation des Hochgeschwindigkeits-Messsystems am RRV-Kolbenringtribometer

Die Lichtführung bei der Verwendung des Hochgeschwindigkeits-Messsystems erfolgt ähnlich wie beim phasengekoppelten System durch einen Laserlicht-Führungsarm. Das Strahlprofil des diodengepumpten Lasers des Hochgeschwindigkeits-Messsystems ist im Gegensatz zum Strahlprofil des blitzlampengepumpten Lasers des phasengekoppelten Systems nicht kreisrund, sondern oval. Durch die Verwendung eines Laserlicht-Führungsarmes, in dessen Inneren mehrere Spiegel für die Umlenkung des Laserstrahls sorgen, ist die räumliche Orientierung des Strahls abhängig von der Position des Armes. Es wurde daher eine Position gesucht, in der die Strahl-Orientierung orthogonal zum Kolbenringsegment ist und diese fixiert. Zur Strahlaufweitung kommt ebenfalls die verstellbare Optik zum Einsatz, die zusätzlich mit einer konkaven Zylinderlinse versehen ist (Brennweite -20 mm). Hinter dieser Optik begrenzt eine Spaltblende den beleuchteten Bereich auf das Kolbenringsegment.

Der Verlauf der Laser-Pulsenergie entlang des Strahlengangs zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8: Verteilung der Laser-Pulsenergie entlang des Strahlengangs

Position	Pulsenergie bei 10 kHz	%
am Laserausgang	2,47 mJ	100
hinter Laserarm	2,04 mJ	83
hinter Strahlaufweitung	1,44 mJ	58
hinter Spaltblende	0,23 mJ	9

Die für die Messung zur Verfügung stehende Pulsenergie beträgt 0,23 mJ bei 10 kHz. Dies entspricht einer Bestrahlungsstärke von 0,008 mJ/mm². Wie beim phasengekoppelten System stehen somit 9% der ursprünglich vorhandenen Pulsenergie an der Messstelle zur Verfügung.

5.3.3 Versuchsvorbereitungen

Um auch mit dem Hochgeschwindigkeits-Messsystem quantitative Aufnahmen zu ermöglichen, sind vor den eigentlichen tribologischen Untersuchungen vorbereitende Messungen notwendig.

Dunkelstrom

Die Detektortemperatur steigt während der Messung deutlich an. Dies deutet trotz verbesserter Luftzufuhr im Vergleich zum phasengekoppelten System auf eine unzureichende Kühlung der Kamera in der Kamerahülle hin. Dabei fällt eine starke Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms auf. Abbildung 89 zeigt das Ergebnis der Dunkelbildmessung in Abhängigkeit der Kamertemperatur.

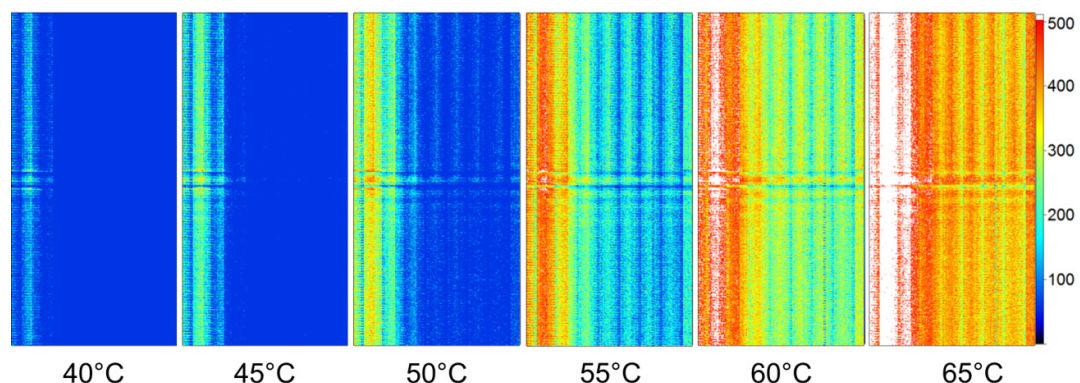


Abbildung 89: Entwicklung des Dunkelbildes im relevanten Bildausschnitt bei steigender Kamertemperatur (automatische Dunkelbildkorrektur abgeschaltet)

Das Hochgeschwindigkeits-Messsystem bietet die Möglichkeit einer automatischen Dunkelbildkorrektur. Dazu wird zu Beginn jeder Messreihe ein Dunkelbild aufgenommen, das anschließend von jedem Bild subtrahiert wird. Während der Messung erwärmt sich die Kamera jedoch, was zu einer ungenauen Dunkelbildkorrektur führt. Zur Messung des temperaturabhängigen Dunkelstroms wurde diese Funktion deaktiviert, um von Beginn der Messung den absoluten Wert des Dunkelbildes zu ermitteln. Die maximal während der Messung aufgetretene Kamertemperatur beträgt bis zu 65°C. Hier treten Werte von durchschnittlich 400 counts im Dunkelbild auf, was etwa 10% des maximalen Messwerts von 4096 counts entspricht. Der Verlauf des durchschnittlichen Dunkelsignals als Funktion der Detektortemperatur der Kamera ist in Abbildung 90 dargestellt.

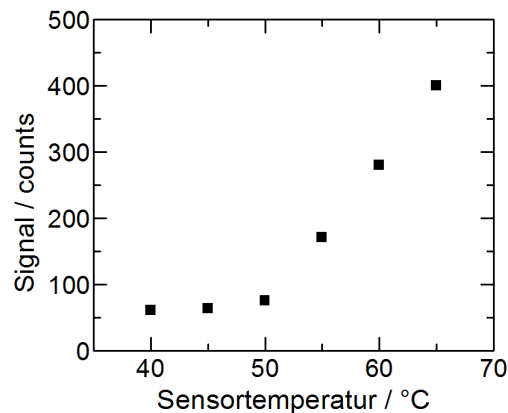


Abbildung 90: Temperaturabhängigkeit des Dunkelsignals der Phantom v611 Kamera (automatische Dunkelbildkorrektur abgeschaltet)

Bis etwa 50°C steigt das Dunkelsignal kaum an. Über 50°C steigt das Signal der Kamera jedoch linear mit etwa 20 counts/°C an. Für zukünftige Messungen muss die Kühlung der Kamera einen Betrieb unter 50°C gewährleisten. Der statistische Anteil des Dunkelsignals beträgt bei 65°C Elektroniktemperatur 27 counts (Standardabweichung), dies entspricht dem Signal einer Ölfilmdicke von 0,13 μm . Der Dynamikumfang beträgt somit 1:150.

Blendenreihe

Durch den deutlich reduzierten Dynamikumfang der Hochgeschwindigkeitskamera im Vergleich zur 16 bit Kamera des phasengekoppelten Systems, ist es vor allem während der Kalibrierung notwendig, mit Hilfe der Blende die Lichtmenge am Detektor zu reduzieren. Um trotzdem eine quantitative Aussage über das Messsignal zu ermöglichen, wurde mit Hilfe verschiedener konstanter Lichtquellen die Blendenreihe des 200 mm Nikon Objektivs mit aufgesetztem Langpassfilter aufgenommen. Hierzu kamen drei LEDs (rot, grün, gelb) und eine Halogen Mikroskop-Beleuchtung zum Einsatz, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Messung der Blendenreihe Nikon AF NIKKOR 200 mm f/4 mit Langpass-Fluoreszenzfilter

Blende	LED 1		LED 2		LED 3		Halogen	
	counts	%	counts	%	counts	%	counts	%
4	3318	100	3895	100	3903	100	3225	100
5,6	2427	73,2	2940	75,5	2821	74,8	2417	74,6
8	1708	51,5	2050	52,6	2161	55,4	1721	53,4
11	1175	35,4	1406	36,1	1434	36,7	1151	35,7
16	79	23,5	970	24,9	956	24,7	758	23,5
22	-	-	586	15,1	607	15,5	471	14,6

Die Durchschnittswerte der drei Messreihen ist in Tabelle 10 angegeben, diese werden zur Kompensation der Blendeneinstellung verwendet. Es zeigt sich eine deutliche Abweichung der einzelnen Blendenstufen vom Idealwert $\sqrt{2} \approx 1,41$. Die Abweichung beim Übergang von Blende 4 auf Blende 5,6 kann mit der teilweisen Abschattung der Objektivlinse durch das optische Filter erklärt werden.

Tabelle 10: Blendenreihe Nikon AF NIKKOR 200 mm f/4 mit Langpass-Filter

Blende	4	5,6	8	11	16	22
Mittelwert in %	100	74,6	53,2	36,0	24,2	15,1
Blendenverhältnis	1,34±0,02	1,40±0,03	1,48±0,02	1,49±0,02	1,60±0,02	

Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz

Durch die deutlich reduzierte Lichtmenge bei der Hochgeschwindigkeitsmessung und der damit verbundenen Notwendigkeit das schmalbandige Bandpassfilter durch ein Langpassfilter zu ersetzen, sind die Bedingungen zur Reduzierung der Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz durch Reabsorption nach Thirouard [73] nicht mehr gegeben, siehe Abschnitt 4.1.1. Die Auswirkungen dieser Modifikation auf spektraler Ebene sind in Abbildung 91 dargestellt.

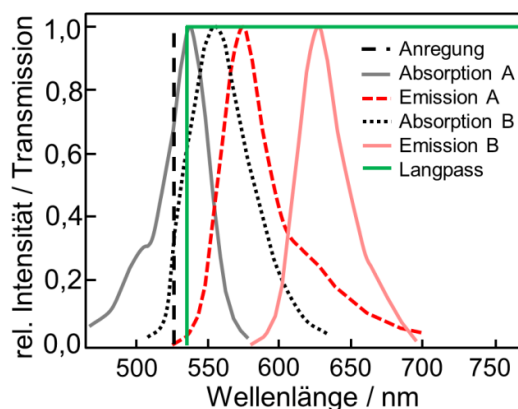


Abbildung 91: Spektrales Optik-Setup bei der Hochgeschwindigkeitsmessung

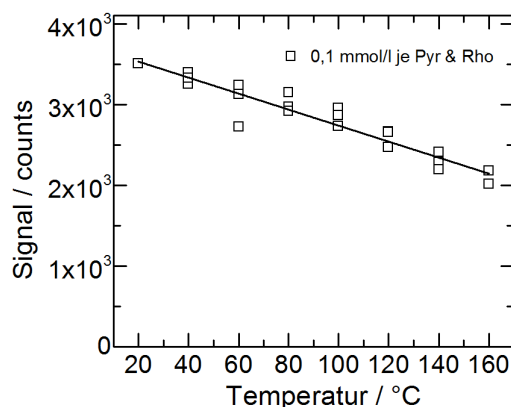


Abbildung 92: Temperaturabhängigkeit der Signalstärke am Hochgeschwindigkeits-Messsystem mit linearer Regression

Durch die Wahl des Langpassfilters mit einer Kantenwellenlänge von 532 nm wird das gesamte Fluoreszenzlicht der Farbstoffmischung jeweils 0,1 mmol/l Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 in Versuchsöl A dem Detektor zugeführt und so die zur Verfügung stehende Lichtmenge maximiert. Das durch Reabsorption zu längeren Wellenlängen verschobene Fluoreszenzlicht wird so nicht mehr aus dem Detektionskanal entfernt, sondern ebenfalls dem Detektor zugeführt.

Das Temperaturverhalten des Fluoreszenzsignals ist in Abbildung 92 zu sehen. Dieses weist einen stetigen Abfall der Fluoreszenzintensität mit der Temperatur auf. Im Vergleich zur Signalstärke bei Raumtemperatur beträgt die Signalstärke bei 80°C noch 86%, bei 140°C noch 65% des Ursprungswertes. Im Vergleich zu den Messungen unter Verwendung des Bandpassfilters zeigt sich eine deutlich ausgeprägter Temperaturabhängigkeit der detektierten Fluoreszenzintensität. Die Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz steigt bei der Verwendung eines Langpassfilters von 0,7 auf 10,4% bei 80°C und von 7,5 auf 35,5% bei 140°C bezogen auf die jeweilige Fluoreszenzintensität bei 20°C. Durch die konstante Versuchstemperatur bei der RRV-Messung wirkt sich die höhere Temperaturabhängigkeit des Fluoreszenzsignals jedoch nicht negativ auf die Messung aus.

Alternative Erzeugung des Flachfelds

Bei der Flachfeldkorrektur wird der Zusammenhang zwischen Fluoreszenzintensität und der Intensität des einfallenden Laserlichts hergestellt. Dies kann durch eine konstant dicke fluoreszierende Schicht und damit einer konstanten Absorption des Laserlichts in der Schicht, erreicht werden. Durch die zunehmende Absorption des Laserlichts mit der Schichtdicke und Sättigungseffekte durch sehr hohe Bestrahlungsstärken, siehe Abschnitte 4.2.3 und 4.2.4, ist ein Einfluss der Flachfeldstärke auf die korrekte Wiedergabe der tatsächlichen Laserlichtverteilung zu erwarten. Die optimale Flachfeldstärke entspricht somit der zur erwartenden Ölfilmstärke im Versuch. Der Reflexionsgrad des optischen Hintergrunds stimmt bestenfalls mit dem im Versuch anzutreffenden Reflexionsgrad überein. Die Erzeugung eines solchen optimalen Flachfelds ist aufgrund des gekrümmten optischen Zugangs schwierig. Der Ansatz, das Flachfeld mittels Silikon-Abdruckmasse herzustellen, gewährleistet eine konstante Flachfeldstärke in der Größenordnung der zu erwartenden Ölfilmstärke im Versuch. Der Reflexionsgrad der Abdruckmasse weicht jedoch deutlich von der metallischen Werkstoffe ab. Die Notwendigkeit, die Laser-Pulsenergie aufgrund von Schädigungen der Silikon-Abdruckmasse zu reduzieren sowie die zeitlich begrenzten Haltbarkeit der Silikonform und die schlechten Handhabbarkeit bei der Positionierung der Form im Quarzglaszylinder, führt zur Suche nach einer alternativen Flachfelderzeugung.

Nach dem Lambert-Beer'schen Absorptionsgesetz wird einfallende Strahlung bei großen Schichtdicken ($d \rightarrow \infty$) nahezu vollständig absorbiert:

$$I_{A\lambda} = I_{0\lambda} \cdot (1 - \exp(-\varepsilon_{\lambda} \cdot c_A \cdot d)) \xrightarrow{d \rightarrow \infty} I_{A\lambda} = I_{0\lambda} \quad (44)$$

Der Einfluss der Schichtdicke auf die Wiedergabe der lokalen Laserlichtverteilung entfällt dadurch ebenso wie in einer konstant dicken Schicht. Die Erzeugung der Flachfeld-Aufnahme durch Verwendung einer sehr dicken Ölschicht, die einfallendes Laserlicht nahezu vollständig absorbiert, kann durch eine vollständige Füllung des Quarzglasrings mit fluoreszenzmarkiertem Öl erreicht werden.

Hierbei wird angenommen, dass die Intensität des Fluoreszenzlichts auch bei großen Schichtdicken proportional zur Intensität des Anregungslichts ist, was im Folgenden untersucht werden soll.

Untersuchungen zur Flachfeldstärke

Zum Vergleich des Einflusses der Flachfeldstärke werden in der Kalibriervorrichtung ein 20 µm dicker Ölfilm und ein 50 mm dicker Ölfilm miteinander verglichen. Abbildung 93 zeigt die Ergebnisse der jeweiligen Flachfeld-Aufnahmen. Dabei kommt fluoreszenzmarkiertes Versuchsol A mit einer Farbstoffkonzentration von jeweils 0,1 mmol/l Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 zum Einsatz. Die Messungen werden mit dem phasengekoppelten System bei einer Bestrahlungsstärke von etwa 0,3 mJ/mm² durchgeführt. Aufgrund des extremen Dickenunterschieds ist das Signal zur besseren Vergleichbarkeit skaliert. Dazu wurde die Fluoreszenzintensität am äußeren Rand des

Laserprofils zu einem Wert von eins definiert. Hier herrscht die geringste Bestrahlungsstärke und es sind somit nur geringste Sättigungseffekte zu erwarten.

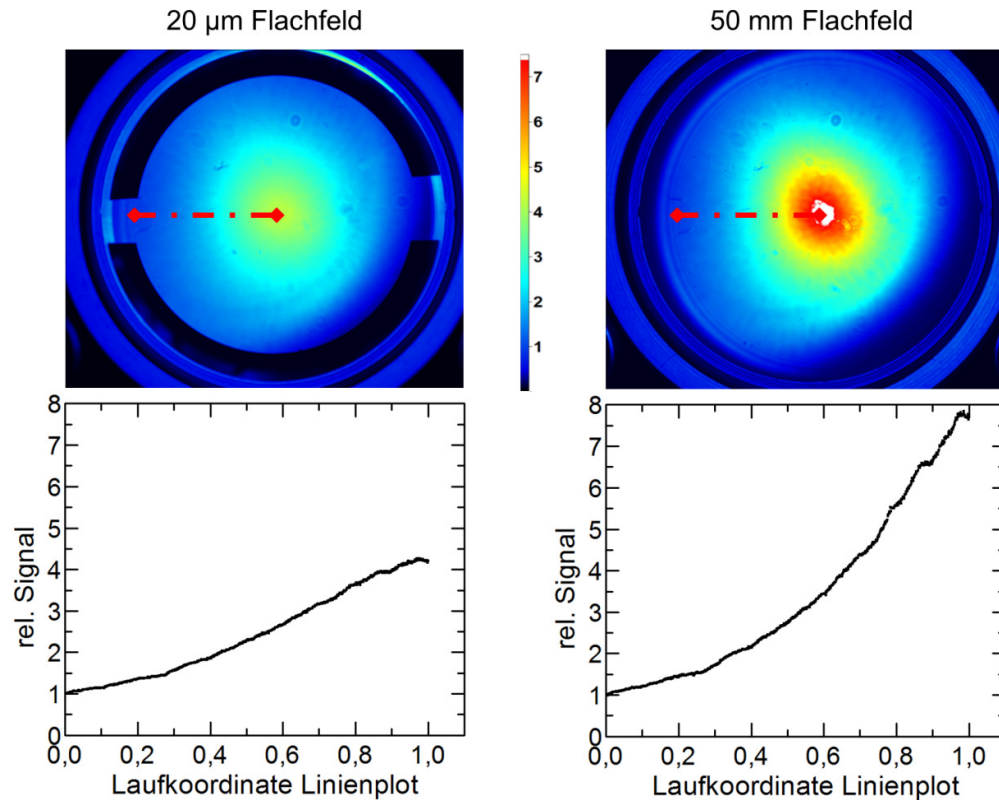


Abbildung 93: Vergleich des Fluoreszenzsignals zwischen verschiedenen dicken Flachfeldern

Das Signal des 20 µm dünnen Flachfelds erreicht im Zentrum maximal den vierfachen Wert des normierten Strahlrandes. Im Vergleich dazu wird beim 50 mm dicken Flachfeld der achtfache Wert des normierten Strahlrandes erreicht. Die unter den jeweiligen Flachfeld-Bildern befindlichen Graphen zeigen einen Linienschrieb des Fluoreszenzsignals entlang der roten strichpunktiierten Linie. Zur besseren Vergleichbarkeit sind in Abbildung 94 beide Intensitätsgrafiken gemeinsam dargestellt. Das Signal des 20 µm dünnen Flachfelds zeigt mit zunehmender Bestrahlungsstärke deutliche Anzeichen von Sättigung. Der Gradient des Signalanstiegs ist im Vergleich zum 50 mm dicken Flachfeld deutlich geringer. Um diese Vermutung zu stützen, wurde der Verlauf der beiden Signalstärken gegeneinander aufgetragen. Abbildung 95 zeigt das Ergebnis.

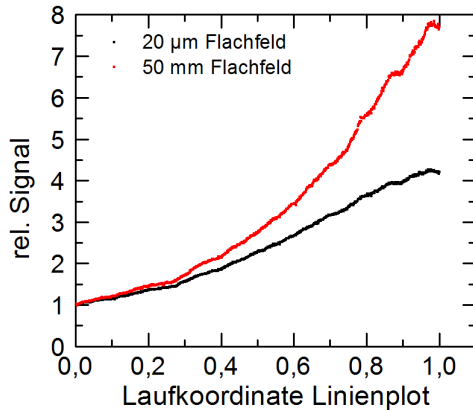


Abbildung 94: Vergleich der relativen Signalstärke der beiden Flachfelddicken

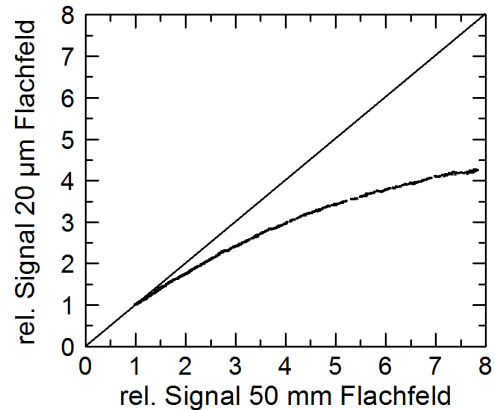


Abbildung 95: Verlauf der Signalstärken gegeneinander aufgetragen und Linie perfekter Übereinstimmung

Auf der x -Achse ist das Signal der 50 mm dicken Schicht aufgetragen. Die y -Achse zeigt das Signal der 20 μm dünnen Schicht. Die zusätzlich im Diagramm eingetragene Ursprungsgrade soll den Verlauf der Graphen bei idealer Übereinstimmung der beiden Signalverläufe verdeutlichen. Der tatsächliche Verlauf des Graphen weicht bei hohen Bestrahlungsstärken deutlich von diesem Ideal ab. Dieses Verhalten ist nachvollziehbar, wenn man annimmt, dass bei der hier vorliegenden sehr hohen Bestrahlungsstärke ein Großteil der Farbstoffmoleküle in der dünnen Schicht angeregt wird und so Sättigung auftritt. Bei der 50 mm dicken Schicht dringt der Laserstrahl weiter in die Ölschicht ein und hat so die Gelegenheit, weitere Farbstoffmoleküle anzuregen und es kommt, über die „Schichtdicke“ integriert, nicht zu einer ausgeprägten Sättigung. Im tribologischen Versuch ist bei hohen Bestrahlungsstärken und der sehr geringen Schichtdicken im Bereich von 3 μm mit erheblichen Sättigungseffekten zu rechnen. Diese werden bei der Verwendung eines sehr dicken Flachfelds nicht korrekt wiedergegeben.

Das Sättigungsverhalten lässt sich jedoch für diesen Fall sehr gut mit einem Polynom 2. Grades annähern. Das Flachfeld-Bild kann so an das Sättigungsverhalten der Ölschicht bei den tribologischen Messungen angepasst werden, siehe Gleichung (45).

$$I_{rel,20\mu m} = -0,0574 \cdot I_{rel,50\text{ mm}}^2 + 0,9812 \cdot I_{rel,50\text{ mm}} \quad (45)$$

Die Steigung dieses Polynoms ist für geringe Bestrahlungsstärken nahezu eins. Sättigungseffekte kommen hier kaum zum Tragen. Die bei den Messungen mit dem Hochgeschwindigkeits-Messsystem auftretende Bestrahlungsstärke von 0,008 mJ/mm^2 beträgt unter 3% der 0,3 mJ/mm^2 beim phasengekoppelten System. Sättigungseffekte treten damit kaum auf und auf eine Korrektur des Flachfelds nach Gleichung (45) kann verzichtet werden.

Die Umsetzung einer möglichst dicken Ölschicht im RRV-Kolbenringtribometer zeigt Abbildung 96.

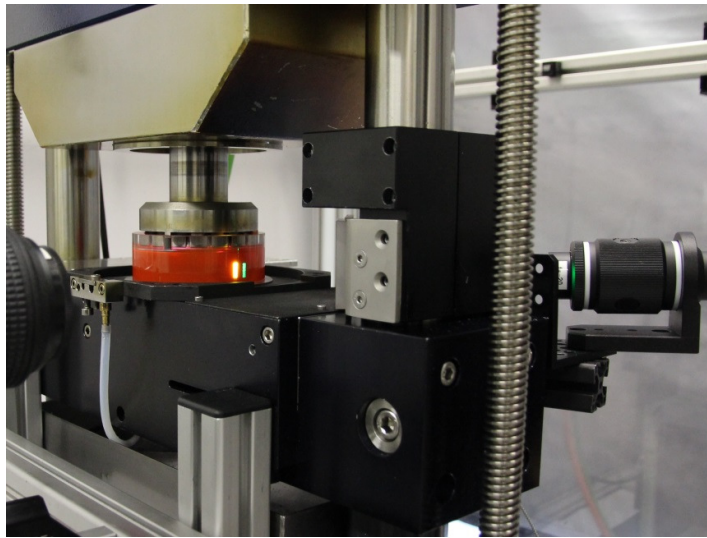


Abbildung 96: Alternative Flachfelderzeugung

Der Quarzglasring des RRV-Kolbenringtribometers wird dazu an der Unterseite abdichtet und vollständig mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllt. Um den ölgefüllten Ring in den Messbereich absenken zu können, muss der Probenhalter für das Pleuelringsegment vollständig aus dem Tribometer entfernt werden. Abbildung 97 zeigt eine Detailaufnahme der Messstelle mit einer konventionellen Digitalkamera während der Flachfeldaufnahme.

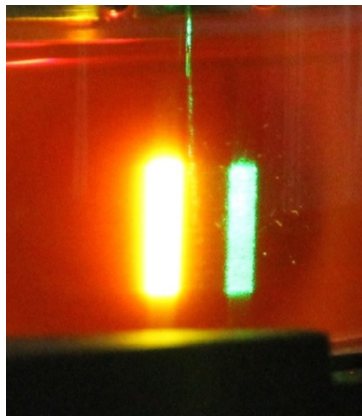


Abbildung 97: Flachfelderzeugung durch vollständig mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllten Quarzglaszylinder

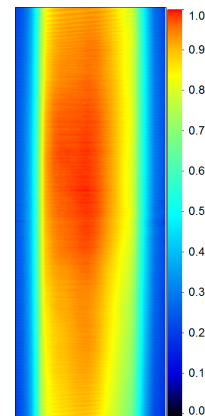


Abbildung 98: Flachfeld Aufnahme mit dem Hochgeschwindigkeits-Messsystem

Ein Teil des Laserlichts wird an der Grenzfläche zwischen Quarzglasring und Luft gestreut und erscheint als grünes Rechteck rechts neben dem orange fluoreszierendem Ölvolumen im Quarzglasring. Das Ergebnis der so vollzogenen Flachfeldaufnahme ist

in Abbildung 98 dargestellt. Das Flachfeld-Bild wird durch Mittelung mehrerer Aufnahmen generiert und ist auf einen maximalen Wert von eins skaliert.

Ermittlung des Kalibrierfaktors

Für die Messungen am Hochgeschwindigkeits-Messsystem wurde der Kalibrierfaktor nach der Kalibrierspaltmethode ermittelt, siehe Abschnitt 5.2.2. Der Kalibrierspalt wurde mittels 10 µm Präzisionsfolien eingestellt. Zur Reduzierung der Lichtmenge erfolgte die Ermittlung des Kalibrierfaktors mit Blende 8. Hierbei kamen sowohl neue als auch gelaufene Kolbenringsegmente zum Einsatz. Die Ergebnisse der Kalibriermessungen sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Ergebnisse der Messung des Kalibrierfaktors unter Verwendung eines nitrierten Kolbenringsegments aus X90CrMoV18 und dem Hochgeschwindigkeits-Messsystem

Segmentzustand	Signalsteigung [counts/µm]
Neu (4 Messungen)	194
	172
	224
	195
Gelaufen (3 Messungen)	229
	216
	216

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden die Messungen mehrfach wiederholt. Die gelaufenen Kolbenringsegmente weisen eine leicht erhöhte Signalsteigung auf. Der bei den Messungen an der Kalibriervorrichtung nachgewiesene geringe Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Kalibrierfaktor bestätigt sich jedoch. Der Kalibrierfaktor wurde daher als Mittelwert aller Messungen zu 207 counts/µm bei einer Blende von 8 ermittelt.

5.3.4 Abschätzung der Messgenauigkeit

Obwohl das Hochgeschwindigkeits-Messsystem in erster Linie zur qualitativen Analyse der Vorgänge im Schmierspalt dient, soll eine Abschätzung der Messgenauigkeit Aufschlüsse über vorhandene Schwachpunkte geben.

Statistische Unsicherheit

Wie bei dem phasengekoppelten System gibt es eine statistische Komponente des Kamerasignals. Das Rauschen des Dunkelsignals beträgt (400 ± 27) counts. Dies ist deutlich ausgeprägter als das Rauschen der CMOS-Kamera des phasengekoppelten

Systems. Die statistische Komponente in der Laser-Intensitätsverteilung ist im beleuchteten Zentrum des Bildes zu sehen. Die Standardabweichung beträgt etwa 38 counts bei 3500 counts durchschnittlicher Signalstärke. Zusätzlich dazu kommt die Puls-zu-Puls Abweichung der gesamten Laserenergie, siehe Abbildung 100. Diese ist mit einer Standardabweichung von etwa 2% jedoch gering.

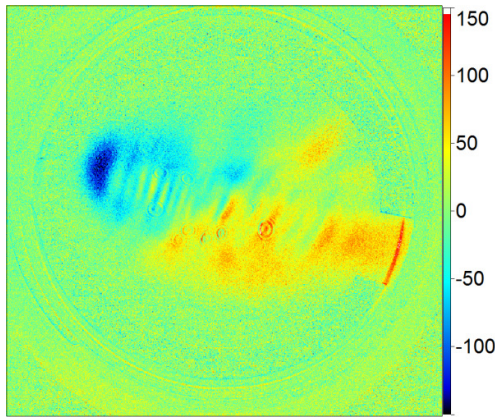


Abbildung 99: Varianz des Laserimpulses und des Kamerasignals gemessen mit der Kalibriervorrichtung bei 55°C Kamertemperatur

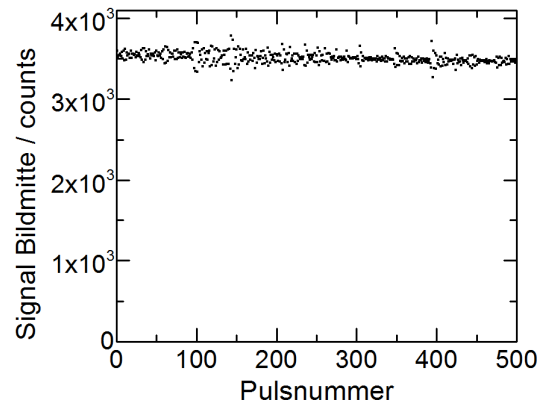


Abbildung 100: Puls-zu-Puls-Abweichung der Laserenergie. Ausgewertet wurde das Durchschnittssignal in der Bildmitte

Der Kalibrierfaktor unterliegt ebenfalls einer statistischen Unsicherheit. Er konnte zu (207 ± 8) counts/ μm bei einer Blende von 8 bestimmt werden. Bei der Variation der Blende ergibt sich eine weitere Unsicherheit von $1,47 \pm 0,02$ pro Blendenstufe.

Systematische Unsicherheit

Die starke Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz bei der Verwendung eines Langpassfilters trägt zur systematischen Messunsicherheit zu. Sie muss für eine quantitative Messung korrigiert werden. Die Signalstärke bei 80°C beträgt $(86 \pm 3)\%$ des Wertes bei Raumtemperatur.

Die deutliche und in ihrer Ausprägung nicht nachvollziehbare Erwärmung des Detektors während der Messung sorgt für eine große Unsicherheit bei der Auswertung der Messung. Wenn von einer maximalen Erwärmung von 65°C ausgegangen wird, entspricht dies einer möglichen Messunsicherheit von ± 300 counts, was einer Filmdicke von etwa $1,5 \mu\text{m}$ entspricht. Die Messunsicherheit liegt somit im Bereich der zu erwartenden Ölfilmdicke. Für eine quantitative Messung ist die Stabilisierung der Kamertemperatur bzw. eine Korrektur des Dunkelsignals somit unumgänglich.

Zuletzt bleibt die Korrektur des Flachfeldes. Hier ist die Angabe einer Messunsicherheit nur schwer möglich. Die gewählte Methode der Flachfeldermittlung berücksichtigt keine Sättigungseffekte, die im geringen Maße jedoch während des Versuchs auftreten. Aufgrund der geringen Bestrahlungsstärke ist der zu erwartende Sättigungseffekt jedoch

gering. Gemäß Formel (45) erreicht das durch Sättigung reduzierte Signal bei der gegebenen Beleuchtungsstärke 98% des Signals des ungesättigten dicken Flachfelds.

Fehlerfortpflanzung und Gesamtunsicherheit

Unter der Annahme, dass die oben genannten Unsicherheiten normalverteilt sind, ergibt sich die Gesamtunsicherheit bei der Einzelmessung einer 2 µm dicken Schicht zu:

$$\Delta \bar{s} = \sqrt{\Delta \bar{ds}^2 + \Delta \bar{il}^2 + \Delta \bar{ilt}^2 + \Delta \bar{c}^2 + \Delta \bar{b} + \Delta \bar{ct} + \Delta \bar{dst}} = 97\% \quad (46)$$

Mit $\Delta \bar{s}$: *Messungenauigkeit* bei der Schichtdickenmessung

$\Delta \bar{ds}$: Statistische *Unsicherheit* des Dunkelstroms

$\Delta \bar{il}$: Statistische *Unsicherheit* in der Laser-Intensitätsverteilung

$\Delta \bar{ilt}$: Statistische *Unsicherheit* in der zeitlichen Laser-Intensitätsverteilung

$\Delta \bar{c}$: Statistische *Unsicherheit* bei der Bestimmung des Kalibrierfaktors

$\Delta \bar{b}$: Statistischer *Unsicherheit* bei der Abblendung

$\Delta \bar{ct}$: Systematische *Unsicherheit* bei der Temperaturkorrektur

$\Delta \bar{dst}$: Systematische *Unsicherheit* des temperaturabhängigen Dunkelstroms

Die enorme Messunsicherheit über 97% wird in erster Linie vom temperaturabhängigen Dunkelstrom der Kamera verursacht, da dieser in der Größenordnung des Fluoreszenzsignals liegt. Gelingt es, diesen zu kontrollieren sinkt die Messunsicherheit auf 9% für das Einzelbild. Die zeitliche Mittelung vieler Messungen zur Reduzierung der Unsicherheiten durch die statistische Abweichung des Dunkelsignals und der zeitlichen und räumlichen Laser-Intensitätsverteilung, entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 5.2.3, ist bei der Hochgeschwindigkeitsmessung nicht zielführend, denn die zeitliche Auflösung der Effekte ist das Ziel der Messung. Aufgrund der erheblichen Messunsicherheit und der bereits erfolgreich durchgeführten Bestimmung der Filmdicke mit dem phasengekoppelten System wird bei der Präsentation der Versuchsergebnisse auf die Absolutwertkalibrierung der Messung verzichtet.

5.3.5 Messergebnisse

Bei der Auswertung der Ergebnisse des phasengekoppelten Messsystems wurde festgestellt, dass ab einer gewissen Gleitgeschwindigkeit der Ölfilm instabil wird. Dies äußert sich darin, dass der Schmierspalt entlang der Längsachse des Kolbenringsegments nicht mehr vollständig mit Öl benetzt ist. Die genaue Analyse der Vorgänge mit dem phasengekoppelten System ist nicht möglich, da lediglich ein Bild pro Umdrehung zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wurde das Hochgeschwindigkeits-Messsystem am Tribometer appliziert. Die Aufgabe der exakten Messung der Ölfilmdicke konnte mit dem phasengekoppelten Messsystem gelöst werden. Auch das Hochgeschwindigkeits-Messsystem lässt sich in gleicher Art und Weise zur Filmdickenmessung verwenden. Im Fokus der Untersuchungen steht jedoch die zeitlich hochaufgelöste Analyse des Ölfilmverhaltens.

Die Vermutung, die Wiederholfrequenz der Instabilitäten entspräche der Drehzahl des Probenhalters am Tribometer, bestätigte sich nicht. Die tatsächliche Wiederholfrequenz der Instabilitäten liegt im Bereich der zehnfachen Spindeldrehzahl. Eine typische Sequenz ist in Abbildung 101 dargestellt.

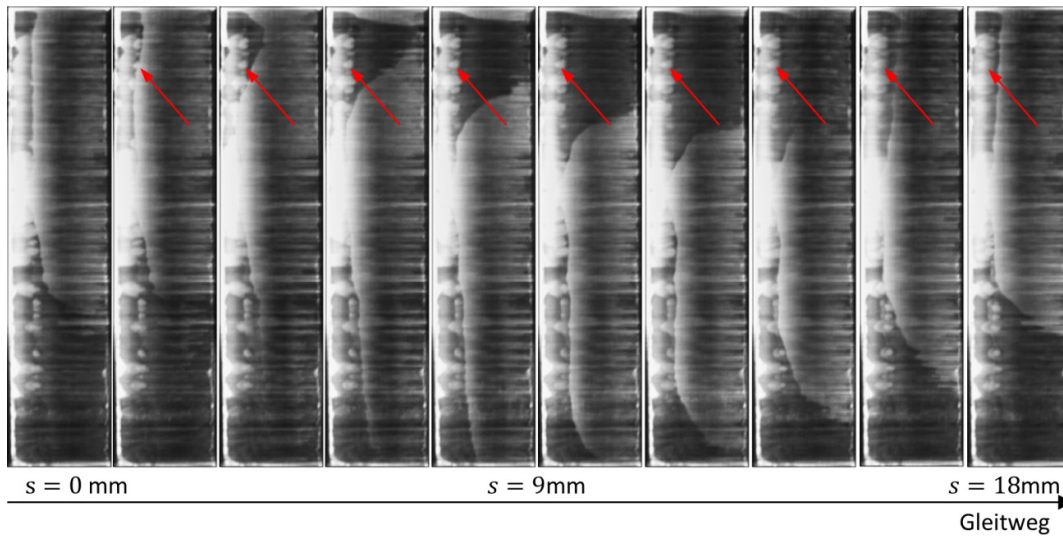


Abbildung 101: Detailuntersuchung der Instabilität, Versuchsöl A, 25 N, 9 m/s

Wie deutlich zu erkennen ist, wandert der ölbenetzte Bereich über das Segment. Die Grenzfläche des Öls an der Vorderseite des Segments bildet eine bogenförmige Einschnürung, an dessen Scheitelpunkt der Ölfilm schließlich abreißt. Ein interessanter Aspekt zeigt sich bei höheren Gleitgeschwindigkeiten im vorderen Bereich des Schmierspalts. Der sich zurückziehende Ölfilm hinterlässt einen kleinen Öltropfen im Bereich des vorderen Kolbenrings. Dieser zerläuft entgegen der Gleitrichtung zur Vorderseite des Segments. Dies deutet zum einen darauf hin, dass Öl am Kolbenringsegment haftet und keine Verbindung zum Ölfilm auf der Lauffläche des Zylindersegments hat, und es zum anderen einer entgegen der Gleitrichtung gerichteten Kraft ausgesetzt ist.

ist. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich um aerodynamische Kräfte handelt, wie in Abbildung 102 dargestellt.

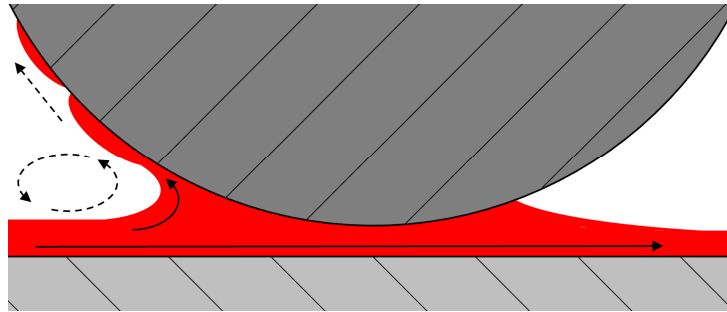


Abbildung 102: Öltransport entgegen der Gleitrichtung bei konvexem Ringsegment-Querschnitt

Luft aus der Grenzschicht oberhalb des Ölfilms kann nicht in den mit Öl gefüllten Spalt eindringen und wird an der Vorderseite des Kolbenringsegments abgeleitet. Die aerodynamische Krafteinwirkung auf den Ölfilm transportiert diesen in Richtung der Segmentvorderseite.

Messung von anhaftendem Öl mittels Totalreflexion

Um die Annahme zu bestätigen, dass ein Teil des Öls ausschließlich auf dem Kolbenringsegment haftet, wurde eine spezielle Beleuchtungsart getestet. Diese basiert auf der Totalreflexion des Anregungslichtes im Quarzglasring. Diese Technik wurde bereits von Greene [62] verwendet, der sie als Ergänzung zur direkten Beleuchtung des Ölfilms sieht. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 103 dargestellt.

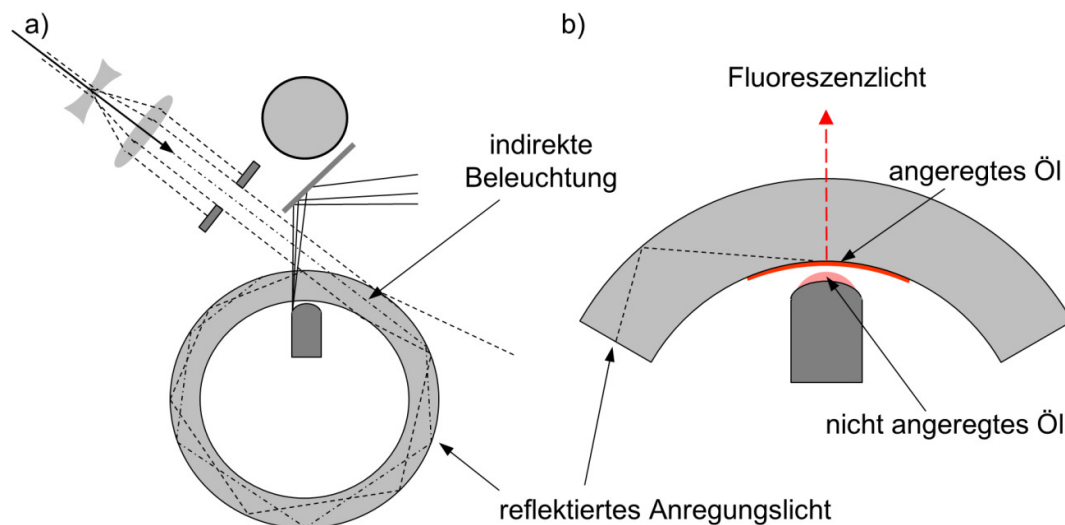


Abbildung 103: Indirekte Beleuchtung mittels Totalreflexion: a) Lichtführung, b) Auskopplung des Anregungslichts aus dem Quarzglasring in den Ölfilm

Der Laserstrahl wird tangential in den Quarzglasring eingekoppelt. Dabei wird ein Teil des Lichtes an der Außenseite des Quarzglasrings reflektiert und steht somit nicht

mehr für die Messung zur Verfügung. Ein Teil des Lichtes hingegen wird im Innern des Zylinders ähnlich den Vorgängen in einem Lichtleiter total reflektiert. Haftet nun fluoreszenzmarkiertes Öl am Quarzglas, so kann das Anregungslicht den Quarzglaszylinder aufgrund der ähnlichen Brechungsindizes von Quarzglas und Motoröl verlassen und das fluoreszenzmarkierte Öl zur Fluoreszenz anregen, siehe Abschnitt 3.2.2.

Auf diese Weise ist nur das am Quarzglaszylinder anhaftende Öl sichtbar. Auch das Öl, das vom Beölungssystem auf der Lauffläche hinterlassen wird, lässt sich so sichtbar machen, was zum Vergleich zweier Beölungsstrategien genutzt wurde. Einmal wurde das Öl direkt mit der Kapillare auf der Laufbahn aufgebracht, alternativ wurde es mittels Druckluft auf die Innenseite des Quarzglaszylinders aufgesprüht, siehe Abbildung 104 und Abbildung 105.

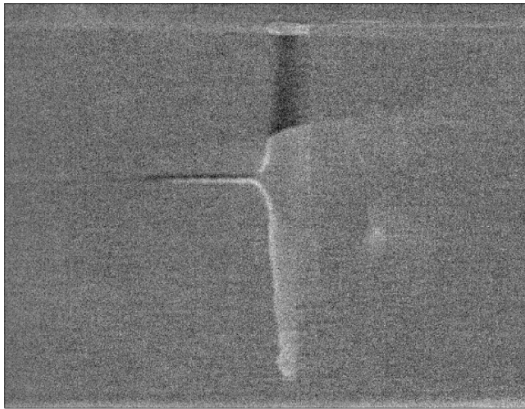


Abbildung 104: Öleintrag durch Kapillare, Versuchsol A, 25 N, 10 m/s, Beleuchtung mittels Totalreflexion. Streuung eines Einzelbildes vom Ensemblemittel

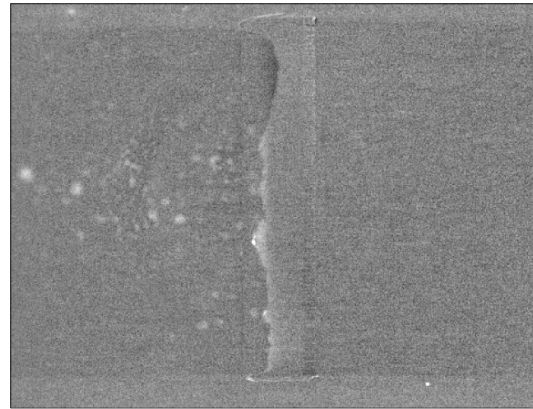


Abbildung 105: Öleintrag durch Spray, Versuchsol A; 25 N, 10 m/s, Beleuchtung mittels Totalreflexion. Streuung eines Einzelbildes vom Ensemblemittel

Durch die indirekte Beleuchtung steht erheblich weniger Licht für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Verfügung. Daher ist die Bildqualität deutlich schlechter als bei den konventionellen Aufnahmen. Um die relevanten Phänomene besser sichtbar zu machen, wurde das Durchschnittsbild der Messung von den einzelnen Aufnahmen abgezogen um so die Streuung der Einzelbilder vom Ensemblemittel sichtbar zu machen. So wurden Bildartefakte durch fluoreszierendes Öl am Segmenthalter erfolgreich reduziert. Diese Form der Hintergrundkorrektur ist bei den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gut möglich, da sich der optische Hintergrund während der kurzen Messzeit von wenigen Millisekunden im Gegensatz zur mehrere Minuten dauernden Messung mit dem phasengekoppelten System nicht wesentlich verändert. Nicht ständig benetzte Bereiche in den korrigierten Aufnahmen erscheinen aufgrund der Hintergrundkorrektur dunkler, siehe Abbildung 104.

Bei beiden Beölungsvarianten ist deutlich zu erkennen, dass eine vollständige Benetzung des Kolbenringsegments bei höheren Gleitgeschwindigkeiten nicht erfolgt. Öl,

das mittels direkter Beleuchtung im vorderen Bereich des Kolbenringsegments sichtbar ist, haftet nicht am Quarzglasring. Es muss daher durch die oben beschriebenen Transportvorgänge dorthin gelangt sein.

Der Vergleich der Beölungssysteme zeigt deutliche Unterschiede im Benetzungsverhalten des Kolbenringsegments während des Betriebs. Das über eine Kapillare lokal zugeführte Öl verteilt sich deutlich schlechter im Schmierspalt als angenommen. Das mittels Gasstrom aufgespritzten Öl sorgt für ein stabileres Ölfilmverhalten, vergleiche Abbildung 104 und Abbildung 105. Die Öltropfen sind gleichmäßiger über die Stirnfläche des Kolbenrings verteilt und versorgen den Schmierspalt gleichmäßiger mit Öl. Basierend auf diesen Messungen wurde das Beölungssystem des RRV-Kolbenringtribometers auf dieses Verfahren umgestellt. Bei der Verwendung des Kapillar-Beölungssystems erkennt man beim Abriss des Ölfilms während einer Instabilität unterschiedliche Ölfilmdicken hinter der Abrissstelle auf der Zylinderwand. Dieses Phänomen wird im Folgenden näher untersucht, siehe Abbildung 106.

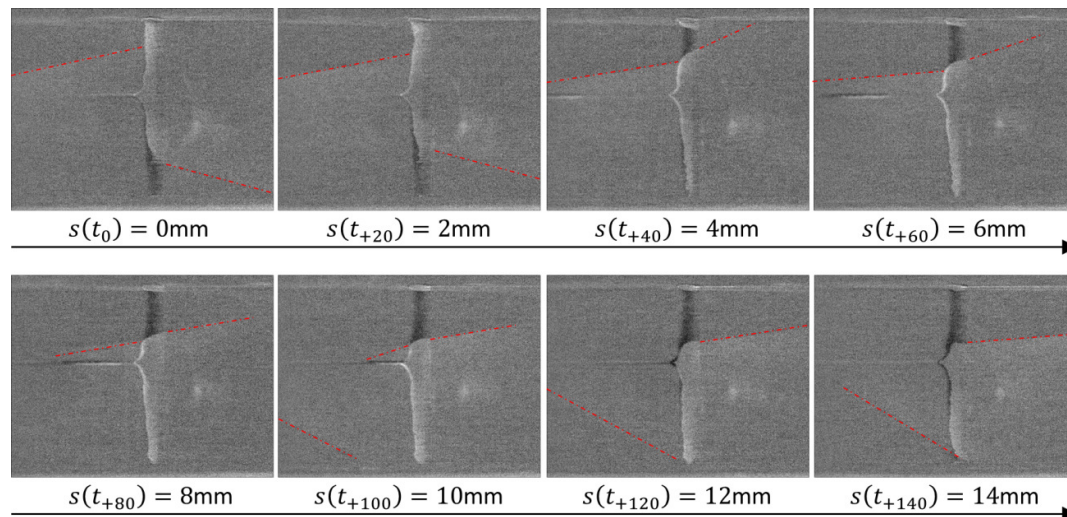


Abbildung 106: Instabilität Ölfilm, Versuchsöl A, 25 N, 10 m/s, Beleuchtung mittels Totalreflexion. Varianz eines Einzelbildes

Zur besseren Sichtbarkeit wurde die Grenzlinie zwischen unterschiedlich dicken Ölschichten auf der Zylinderwand mit einer roten strichpunktierten Linie markiert. An der Oberseite des Segments ist der Effekt besser zu erkennen. Die Instabilität des Ölfilms mit der daraus resultierenden wellenförmigen Füllung und Leerung des Schmierspalts hinterlässt auf der Quarzglasoberfläche einen mehr oder weniger dicken Ölfilm. Dieser wird über die Drehung des Zylindersegments wieder der Vorderseite des Kolbenringsegments zugeführt. Das schwankende Ölangebot führt so zu einer Selbstverstärkung der Instabilität. Insgesamt liefert die Beleuchtung mittels Totalreflexion wertvolle Zusatzinformationen zum Benetzungszustand im Schmierspalt und hilft so, die Transportvorgänge des Öls besser sichtbar zu machen. Die direkte Beleuchtung und die indirekte Beleuchtung mittels Totalreflexion ergänzen sich somit gegenseitig.

6 Messungen am optisch zugänglichen Einzylindermotor

Um die Vorgänge in der Kolbengruppe im realen Motorbetrieb untersuchen zu können, kommt ein optisch zugänglicher Einzylindermotor zum Einsatz. Dieser ermöglicht durch zwei seitliche Fenster in der Lauffläche des Zylinders den Blick auf die Kolbengruppe.

6.1 Aufbau und Funktion des Einzylindermotors

Dieser Abschnitt beschreibt den mechanischen Aufbau des optisch zugänglichen Einzylindermotors und die Umsetzung des optischen Zugangs.

6.1.1 Mechanischer Aufbau und technische Daten

Moderne Ottomotoren bieten dank Aufladung und Direkteinspritzung eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig günstigen Schadstoffemissionen. Die Weiterentwicklung des Ottomotors steht somit im Fokus aktueller Forschung. Der Daimler Ottomotor M270/M274 DE20 LA wurde daher als Versuchsträger gewählt. Die Motordaten sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 12: Technische Daten des M270/M274 DE20 LA

Triebwerksdaten		Angabe	Einheit
Hubraum Zylinder		498	cm ³
Hub		92	mm
Bohrung		83	mm
Pleuellänge		138,7	mm
Verdichtungsverhältnis		9,8:1	-
Anzahl der Ventile	4, V-förmig hängend		-
Brennverfahren	Otto DI, homogen		-
Max. Spitzendruck		130	bar
Max. indizierter Mitteldruck		22,1	bar
Injektor	Piezo Bosch HDEV 4.1		-
Einspritzdruck		20	MPa
Nenndrehzahl		5500	1/min

Die Visualisierung der Vorgänge in der Kolbengruppe erfordert optische Zugänge in der Zylinderlaufbahn. Wegen der besseren Zugänglichkeit zur Zylinderbuchse wurde ein Einzylinder-Aggregat als Versuchsträger gewählt, das basierend auf dem Vollmotor konstruiert wurde. Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen den Einzylindermotor.

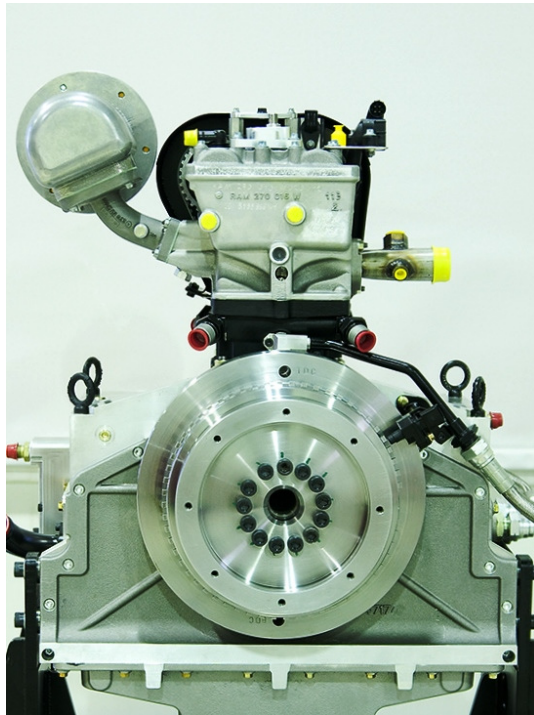


Abbildung 107: Einzylindermotor gesehen von der Abtriebsseite

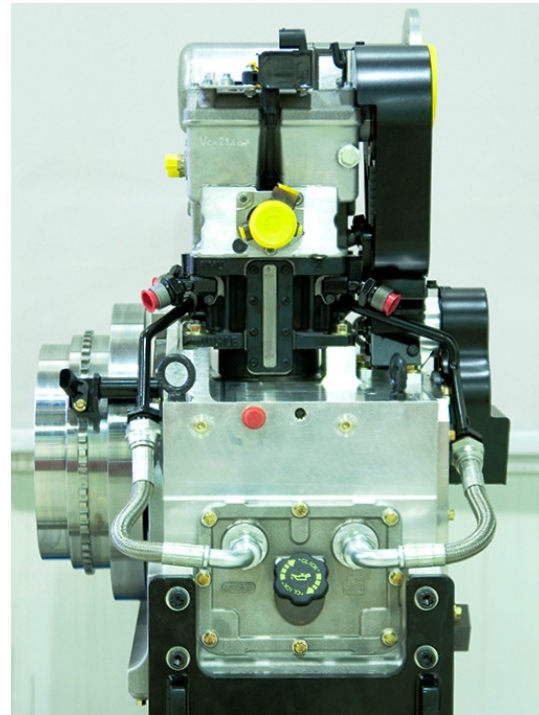


Abbildung 108: Einzylindermotor in Seitenansicht

Das Kurbelgehäuse besteht aus einer Aluminiumlegierung und nimmt die Kurbelwelle sowie die vier Ausgleichswellen auf, die die ausgeprägten Massenkräfte und Massenmomente erster und zweiter Ordnung des Einzylindermotors kompensieren. Im Gegensatz zum Vollmotor, dessen Grauguss-Zylinderlaufbuchsen im Kurbelgehäuse eingegossen sind, sind Zylinderrohr und Kurbelgehäuse beim Einzylindermotor getrennt, um den optischen Zugang über den vollen Hub gewährleisten zu können. Das schwarz lackierte Zylinderrohr bildet eine Einheit mit den Kühl- und Öl-Kanälen und besteht vollständig aus Grauguss. Oberhalb des Zylinderrohrs befindet sich der Zylinderkopf, dessen Brennraumgeometrie dem Vollmotor entspricht. Abweichend vom Vollmotor besitzt der optisch zugängliche Einzylindermotor jedoch keine Nockenwellenverstellung. Die Ventilsteuerzeiten sind somit in jedem Betriebspunkt gleich. Das Saugrohr und das Auspuffrohr sind so angebracht, dass die Sicht auf die optischen Zugänge nicht behindert wird.

Der Einzylindermotor wird auf einem Prüfstand installiert, der in der Lage ist, den Motor sowohl zu schleppen als auch zu bremsen. Die dabei auftretenden Drehmomente werden über eine Drehmomentmesswelle erfasst. Die Betriebsmedien Wasser und Öl

können in Druck und Temperatur konditioniert werden. Der Einzylindermotor verfügt über drei getrennte Ölkreisläufe für den Zylinderkopf, den Kurbeltrieb und die Ölspritzdüse zur Kolbenkühlung. Die Menge an Leakage-Gas (Blowby) sowie die Druckverhältnisse im Saugrohr und Brennraum werden gemessen. Die Ansteuerung von Zündung und Einspritzung führt eine frei programmierbare Motorsteuerung aus.

6.1.2 Optischer Zugang

Um die Vorgänge in der Kolbengruppe über den gesamten Hub beobachten zu können, ist ein optischer Zugang in der Zylinderwand notwendig. Der Einsatz eines vollständig transparenten Zylinderrohres ist nur bei geschlepptem Betrieb oder sehr geringer Last sinnvoll, da die mechanische Stabilität unzureichend ist und eine ausreichende Kühlung nicht gewährleistet werden kann [62, 94]. Für den gefeuerten Motorbetrieb eignen sich Fenster, die in die Zylinderwand eingelassen werden. Für das Fenstermaterial kommt sowohl Quarzglas als auch Saphir in Frage. Der Einsatz von Saphirfenstern für optische Zugänge in der Zylinderwand ist etabliert [70, 73]. Saphir hat im Verbund mit Gusseisen einige Vorzüge gegenüber Quarzglas, siehe Tabelle 13.

Tabelle 13: Vergleich der Eigenschaften von Quarzglas und Saphir

Eigenschaft	Gusseisen	Quarzglas	Saphir	Einheit
Dichte	7,2	2,21	3,99	g/cm ²
Schmelzpunkt	1150	1713	2050	°C
E-Modul	90	76,5 – 97	345 – 460	GPa
Härte	etwa 4 [109]	5,5 – 6,5	9	Mohs
Wärmeausdehnung	11,7	0,54	etwa 6 *	1 · 10 ⁻⁶ /K
Wärmeleitfähigkeit	50	1,4	12,56 – 46,06 *	W/(m · K)

* je nach Kristallgitterorientierung

Vor allem die thermischen Eigenschaften von Saphir qualifizieren ihn gegenüber Quarzglas. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist zwar um den Faktor 2 geringer als der von Gusseisen, im Gegensatz zu Quarzglas ist er jedoch wenigstens in derselben Größenordnung. Zusätzlich weist Saphir eine wesentlich bessere Wärmeleitfähigkeit als Quarzglas auf. Diese Eigenschaften sind vorteilhaft bei der Vermeidung thermischer Spannungen im Fenster und Verzügen in der Zylinderlaufbahnform. Charakteristisch für Saphir ist seine große Härte im Vergleich zu Gusseisen. Dies erschwert die Bearbeitung der Zylinderbohrung nach dem Einsetzen der Fenster in den Grauguss-Zylinder, bewahrt die Fenster jedoch auch vor Verschleiß.

Der Kolben übt aufgrund der Gaskräfte und der wechselnden Stellung der Pleuelstange wechselnde Seitenkräfte auf die Zylinderwand aus. Die Seitenflächen der Zylinder-

bohrung werden daher in Druck- und Gegendruckseite unterschieden (siehe Abschnitt 2.2.1). Da die Seitenkräfte auch das Verhalten des tribologischen Systems beeinflussen, ist der Einzylindermotor mit zwei Saphirfenstern, je einem auf Druck- und Gegendruckseite, ausgestattet. Die Saphirfenster werden vor der Endbearbeitung der Zylinderbohrung in den Zylinder eingesetzt und anschließend fertig bearbeitet. Die harte Oberfläche der Saphirfenster kann nicht sinnvoll gehont werden, daher bleibt sie im Bearbeitungszustand nach dem Schleifen des Bohrungsdurchmessers. Abbildung 109 und Abbildung 110 zeigen Detailansichten des Saphirfensters in der Zylinderlaufbahn.

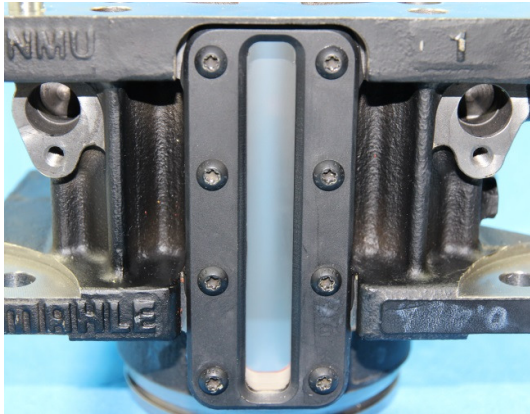


Abbildung 109: Optischer Zugang in Draufsicht

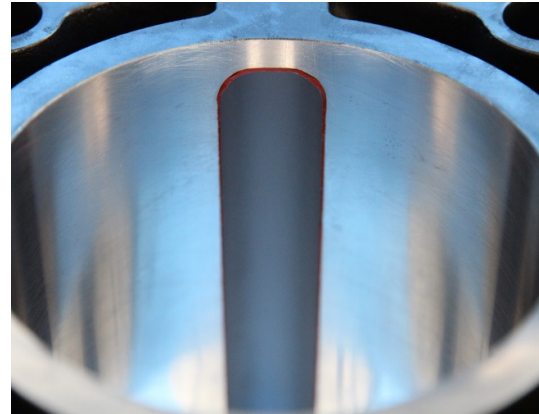


Abbildung 110: Optischer Zugang in der Zylinderbohrung

Die Fenster haben eine Größe von $115 \times 17 \text{ mm}^2$ und sind mit hochtemperaturfestem Silikon in den Graugusszylinder eingeklebt. Eine Halteklemme auf der Außenseite des Fensters, die radial wirkende Kräfte auf das Fenster abfängt, reduziert den sichtbaren Bereich auf $110 \times 14 \text{ mm}^2$. Zur Vermeidung von Reflexionen ist der Bereich um die Fenster schwarz lackiert.

6.2 Applikation des phasengekoppelten Messsystems

Dieser Abschnitt beschreibt die Applikation des phasengekoppelten Messsystems am optisch zugänglichen Einzylindermotor und die Durchführung vorbereitender Kalibriermessungen.

6.2.1 Strahlführung

Aufgrund der zweifach ausgeführten optischen Zugänge auf Druck- und Gegendruckseite verfügt die optische Messtechnik am Einzylindermotor über zwei identisch aufgebaute Strahlengänge mit jeweils einer Kamera. Eine Übersicht des optischen Aufbaus zeigt Abbildung 111.

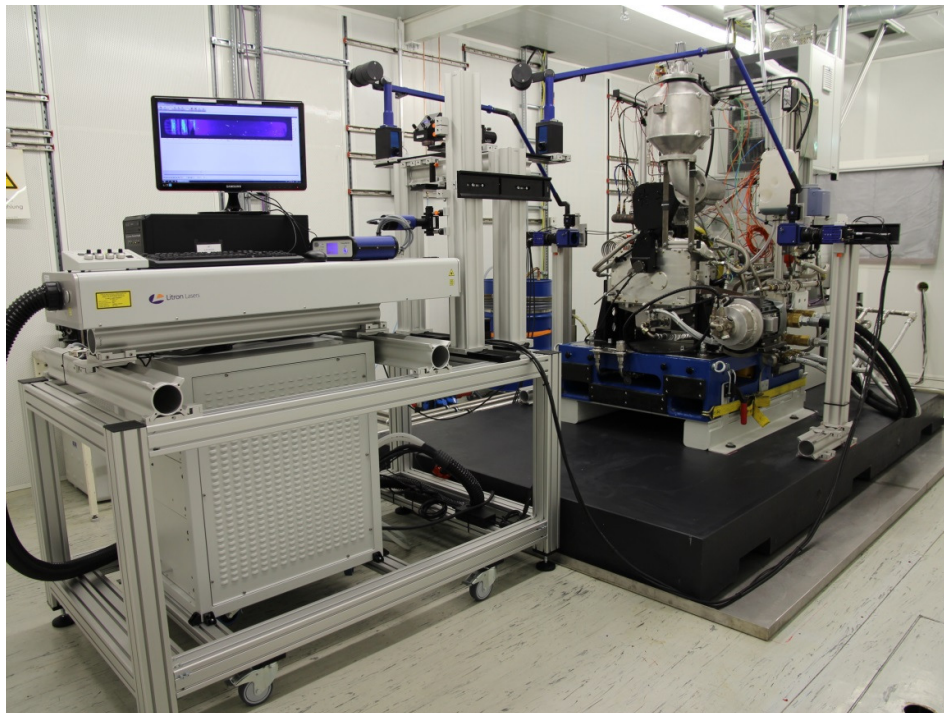


Abbildung 111: Optikaufbau am Einzylindermotor

Der Laser steht auf einem Wagen an der Stirnseite des Motors. Der Laserstrahl wird auf dem Laserwagen durch einen Strahlteiler aufgeteilt und in zwei Laserlicht-Führungsarme eingekoppelt. Diese transportieren das Laserlicht zu den zwei Messstellen auf der Druck- und Gegendruckseite, wo das kreisrunde Strahlprofil mittels der vom RRV-Kolbenringtribometer bekannten verstellbaren Optik aufgeweitet wird. Details zum Strahlengang an den Messstellen zeigt Abbildung 112.

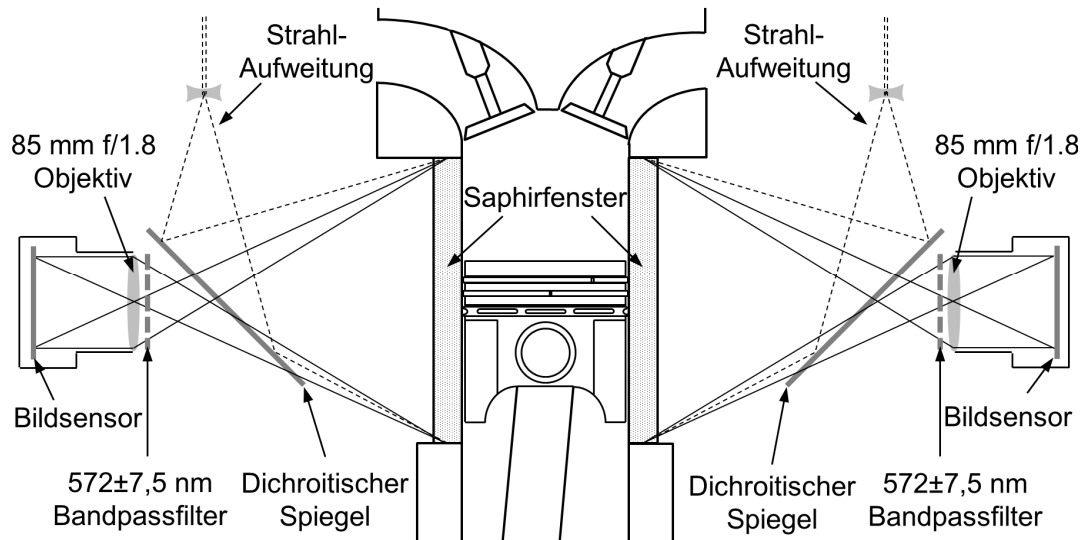


Abbildung 112: Strahlengang am optisch zugänglichen Einzylindermotor

Eine nachgeschaltete konkave Zylinderlinse mit einer Brennweite von -50 mm streckt das Strahlprofil so, dass die gesamte Fensterhöhe beleuchtet werden kann. Eine weitere Formatierung des Strahlprofils mittels Spaltblenden erfolgt nicht. Der aufgeweitete Strahl wird von oben über einen dichroitischen Spiegel auf die Messstelle reflektiert. Das Fluoreszenzlicht kann den auf die Laserwellenlänge ausgelegten dichroitischen Spiegel aufgrund der spektralen Verschiebung unreflektiert passieren und wird durch ein Objektiv mit 85 mm Brennweite und einer maximalen Blendenzahl von $f/1.8$ (Nikon AF-S Nikkor 85 mm) auf den Kamerasensor projiziert. Vor dem Objektiv befindet sich das bekannte Bandpassfilter mit 572 nm zentraler Transmissionswellenlänge und einer Halbwertsbreite von 15 nm. Abbildung 113 und Abbildung 114 zeigen die Ausführung der Optik.

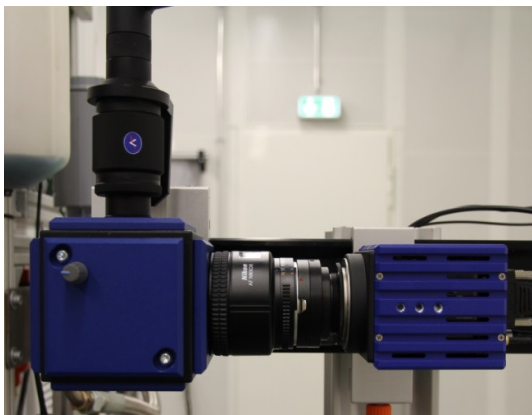


Abbildung 113: Strahlteiler mit Laserstrahl-Aufweitung und Kamera

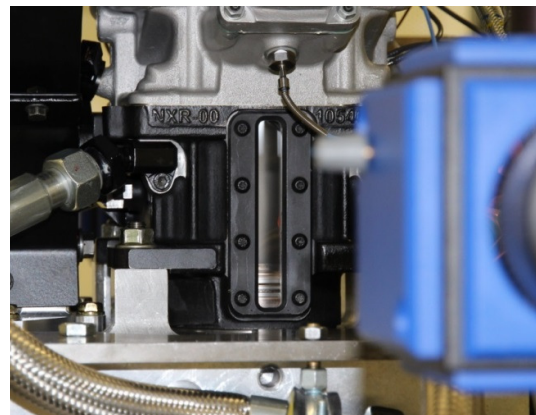


Abbildung 114: Optischer Zugang des Einzylindermotors

Der dichroitische Spiegel befindet sich in dem blauen Würfel auf der linken Seite. Die Strahlaufweitung ist an der Oberseite des Gehäuses fixiert. Die Aufhängung des Spiegels ist einstellbar, um den aufgeweiteten Strahl auf die Messstelle auszurichten zu können. Die Kamera ist hinter dem dichroitischen Spiegel montiert und auf den optischen Zugang ausgerichtet.

Laser-Pulsenergie

Um beide optischen Zugänge auf Druck- und Gegendruckseite des Motors mit Licht zu versorgen, wird der Laserstrahl durch einen Strahlteiler aufgeteilt. Die Pulsenergie entlang des Strahlengangs zeigt Tabelle 14. Es wurden beide Laser A und B vermessen, jedoch nur Laser A bei den Messungen verwendet.

Tabelle 14: Verteilung der Pulsenergie entlang des Strahlengangs am optisch zugänglichen Einzylindermotor

Position	Laser A		Laser B	
	Druckseite	Gegendruckseite	Druckseite	Gegendruckseite
Vor Strahlteiler	105 mJ		98 mJ	
Hinter Strahlteiler	30 mJ	47 mJ	28 mJ	44 mJ
Am Fenster	18 mJ	29 mJ	16 mJ	25 mJ

Der Strahlteiler teilt die Pulsenergie nicht gleichmäßig auf beide Fenster auf. Der optische Zugang der Gegendruckseite erhält etwa 60% mehr Energie.

Bezogen auf die Fenstergröße ergibt sich eine durchschnittliche Bestrahlungsstärke von 0,01 – 0,02 mJ/mm². Diese liegt damit um den Faktor 15 bis 30 unter der Bestrahlungsstärke des phasengekoppelten Systems am RRV-Kolbenringtribometer und lässt somit geringe Sättigungseffekte bei der Filmdickenmessung erwarten.

Projizierte Pixelgröße

Durch den Einsatz eines Objektivs mit 50 mm Brennweite ergibt sich bei der Abbildung der Saphirfenster auf Druck- und Gegendruckseite eine projizierte Pixelgröße von etwa 53×53 µm².

6.2.2 Versuchsvorbereitung

Um in einem größeren Schichtdicken-Messbereich ein lineares Verhalten von Schichtdicke und Fluoreszenzsignal zu erreichen, wird für die Versuche am Einzylindermotor eine Farbstoffkonzentration von jeweils 0,025 mmol/l Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 gewählt. Dies entspricht einem Viertel der am RRV-Kolbenringtribometer eingesetzten Farbstoffkonzentration. Gemäß des in Abschnitt 4.2.3 gefundenen Zusammenhangs zwischen Farbstoffkonzentration, Schichtdicke und Sättigung ist so bis zu einer Ölfilmdicke von 200 μm mit einem linearen Signalverlauf zu rechnen. Trotz der deutlich reduzierten Farbstoffkonzentration im Vergleich zur Messung am Tribometer kommt es durch den Einsatz des lichtstarken Objektivs zur Sättigung des Detektors. Aus diesem Grund wurde die Blende um zwei Blendenstufen auf Blende 4 geschlossen, wodurch sich gleichzeitig die erzielbare Schärfentiefe erhöht.

Erzeugung des Flachfelds

Die Erzeugung einer konstant dünnen Schicht zur Korrektur der Licht-Intensitätsverteilung im beobachteten Bereich über die gesamte Fensterfläche von $115 \times 17 \text{ mm}^2$ ist nur schwer möglich. Inagaki [70] verwendet dazu eine fluoreszenzmarkierte Vinylfolie an der Innenseite des optischen Zugangs. Die Applikation dieser Folie bedingt jedoch die Demontage des Zylinderkopfes. Zudem muss ein gleichmäßiges Anliegen der Folie über der gesamten Fensterfläche sichergestellt werden. Mit der vollständigen Füllung des Zylinders mit fluoreszenzmarkiertem Öl zur Flachfeldkorrektur wurde ein alternatives Verfahren gefunden, das auch ohne die Demontage des Zylinderkopfes angewendet werden kann (Füllung durch das Zündkerzenloch) und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die bei der Messung am Einzylindermotor auftretenden Bestrahlungsstärken sind im Vergleich zur Messung mit dem phasengekoppelten System am RRV-Kolbenringtribometer gering was nur geringe Sättigungseffekte erwarten lässt, siehe Abschnitt 5.3.3.

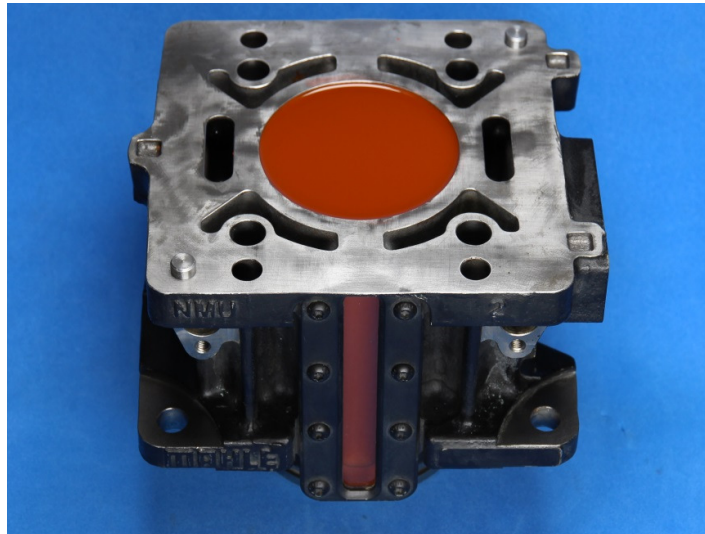


Abbildung 115: Methode zur Bestimmung des Flachfelds am Einzylindermotor

Zur Füllung des Zylinders wird dieser unterhalb des Fensters mit einer Dichtplatte abgedichtet und vollständig mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllt (Abbildung 115).

Im Bild ist der ölgefüllte Zylinder außerhalb des Motors zu sehen. Die eigentliche Flachfeldaufnahme wurde jedoch bei montiertem Zylinder am Motorprüfstand durchgeführt. Die Ergebnisse der Aufnahmen für Druck- und Gegendruckseite sowie die beiden Laser A und B sind in Abbildung 116 dargestellt.

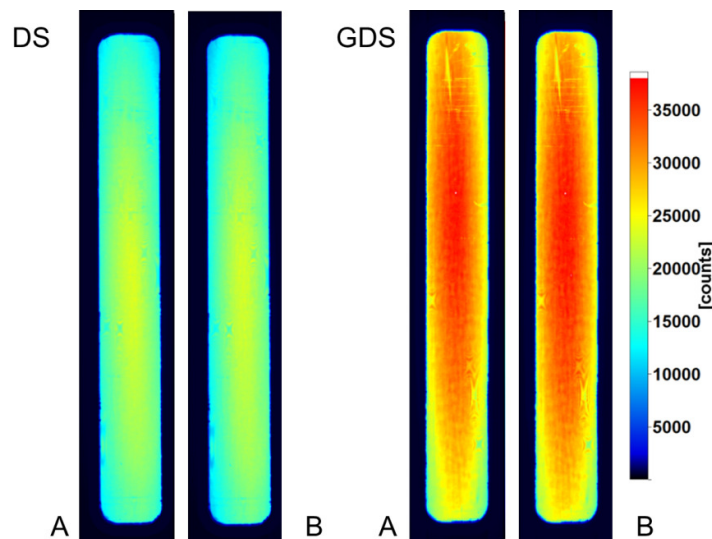


Abbildung 116: Vergleich der Flachfeldbilder auf Druck- und Gegendruckseite bei Beleuchtung mit den Laserkavitäten A und B

Zur Anpassung der Lichtintensität wird die Blende geschlossen, bis keine Sättigung des Detektors mehr erfolgt. Die Blendeneinstellung wird zur besseren Vergleichbarkeit auf Druck- und Gegendruckseite (DS bzw. GDS) gleich gewählt. Das durch die Zylinder-

derlinse verzerrte Strahlprofil und die höhere Pulsenergie auf der Gegendruckseite sind deutlich zu erkennen. Die um 60% höhere Pulsenergie auf der Gegendruckseite resultiert in einem ebenfalls etwa 60% höherem Signal im Vergleich zur Druckseite. Dies bestätigt die korrekte Wiedergabe der Laserintensität durch die gewählte Methode der Flachfelderzeugung. Innerhalb des Flachfeldes findet sich eine Intensitätsvariation von 60 – 100%. Diese ist deutlich größer als bei den Messungen am RRV-Kolbenringtribometer und dadurch zu erklären, dass am Einzylindermotor das komplette Strahlprofil zur Beleuchtung der Messstelle verwendet wird. Am Tribometer wird durch die Formatierung mittels Spaltblende nur das Zentrum des Strahlprofils verwendet.

Ermittlung der Kalibrierfaktoren

Anders als am RRV-Kolbenringtribometer, dessen Kolbenringsegment einen konstanten Reflexionsgrad aufweist, finden sich im Bereich des Kolbens unterschiedliche Oberflächen mit jeweils verschiedenen Reflexionsgraden. Neben den Kolbenringen, die jeweils aus unterschiedlichen Materialien bestehen, finden sich auch auf dem Kolben verschieden beschaffene Oberflächen. Das Grundmaterial des Kolbens ist eine Aluminiumlegierung. Im Bereich des ersten Kolbenrings ist die Ringnut zum Schutz vor Verschleiß hartnitriert. Das Kolbenhemd ist mit einer graphithaltigen Gleitschicht versehen. Die relevanten Flächen für eine Kalibrierung sind in Abbildung 117 gekennzeichnet, dabei soll der Kalibrierfaktor jeden Oberflächentyps zu Vergleichszwecken doppelt ermittelt werden.

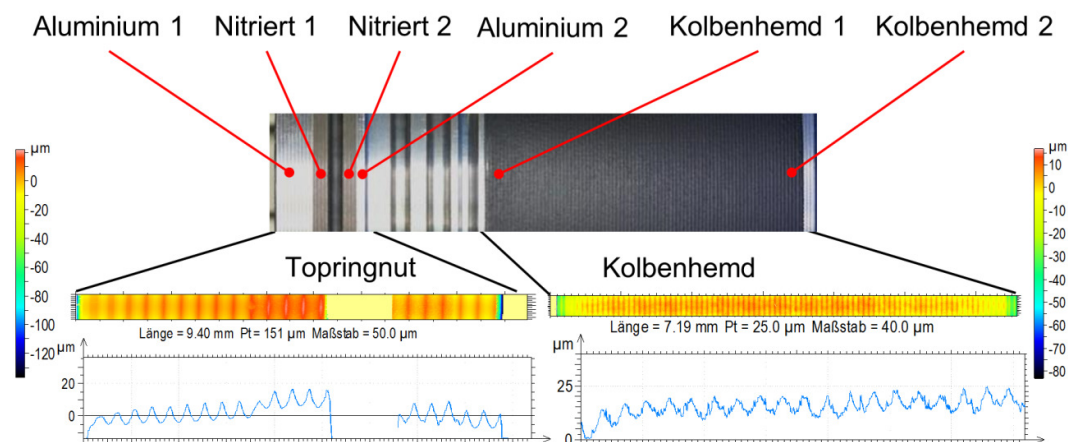


Abbildung 117: Definition der Oberflächenmesspunkte (Kolben liegend)

Auf der Flanke des Kolbens sind die Bearbeitungsspuren der Drehbearbeitung zu erkennen. Thirouard [73] schlägt vor, diese Bearbeitungsspuren zur Kalibrierung der Messtechnik zu verwenden. Der Abstand dieser Riefen beträgt etwa 360 µm. Bei einer projizierten Pixelgröße von 52×52 µm² kann die detaillierte Riefentiefe damit nicht vollständig wiedergegeben werden. Dieses Verfahren erfordert somit einen besseren Ab-

bildungsmaßstab und kann mit dem aktuell verwendeten 85 mm Objektiv nicht angewendet werden.

Ein weiteres Verfahren basiert auf der Kalibrierung mittels Kalibriersegment und der Einstellung einer definierten Filmdicke mittels Präzisionsfolien. Dies wurde bereits von Baba [74] eingesetzt, der die unterschiedlichen Reflexionsgrade des Hintergrundes jedoch unberücksichtigt lässt. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens verspricht somit eine Steigerung der Messgenauigkeit. Für die Kalibrierung der Kolbenringe werden diese im Zylinderrohr positioniert, wo sie durch ihre Eigenspannung gleichmäßig an der Zylinderwand anliegen. Der Abstand zwischen Kolbenring und Saphirfenster kann nun ebenfalls durch die Präzisionsfolien eingestellt werden. Der Bereich zwischen Kolbenring und Saphirfenster wird mit dem fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllt und mit der optischen Messtechnik aufgenommen. Die Ergebnisse der Kalibriermessungen sind in Abbildung 118 und Abbildung 119 dargestellt.

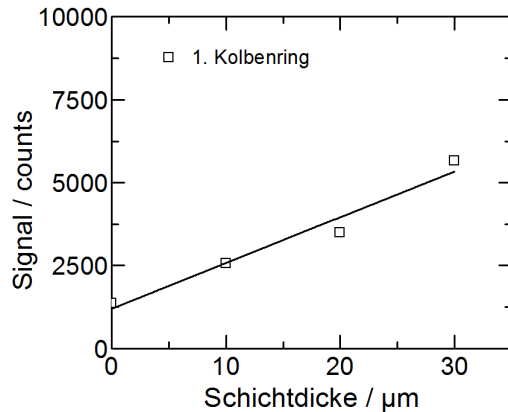


Abbildung 118: Kalibrierung 1. Kolbenring

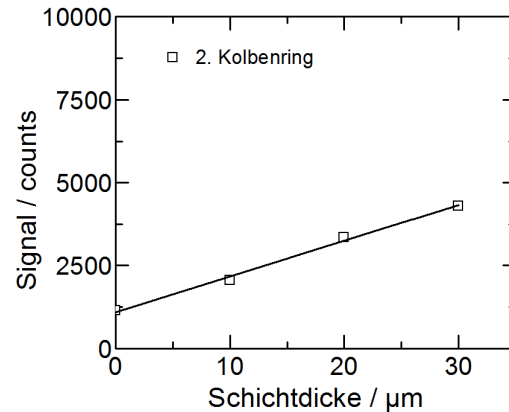


Abbildung 119: Kalibrierung 2. Kolbenring

Anhand der vier verschiedenen Messpunkte bei 0 – 30 μm können die Kalibrierfaktoren für die Ölfilmdickenmessung zwischen den Kolbenring und dem Saphirfenster durch Auswertung der Signalsteigung bestimmt werden.

Für die Kalibrierung der Kolbenmaterialien wurde ein Kalibriersegment aus einem Serienkolben hergestellt, siehe Abbildung 120. Das Kalibriersegment wird in die Zylinderbohrung vor dem optischen Zugang eingesetzt. Dabei wird der Spalt zwischen Saphirfenster und Kalibriersegment mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllt und anschließend mit dem optischen System abgebildet. Die Spalthöhe kann durch den Einsatz von Präzisionsfolien, die paarweise seitlich des optischen Zugangs angebracht werden, variiert werden. Um die Positionierung der Präzisionsfolien zu erleichtern, wurde das Kalibriersegment mit vier zylinderförmigen Magneten ausgestattet, die es erlauben, die metallischen Folien daran zu befestigen. Zur besseren Handhabbarkeit wird das Kalibriersegment ohne Kolbenringe eingesetzt.

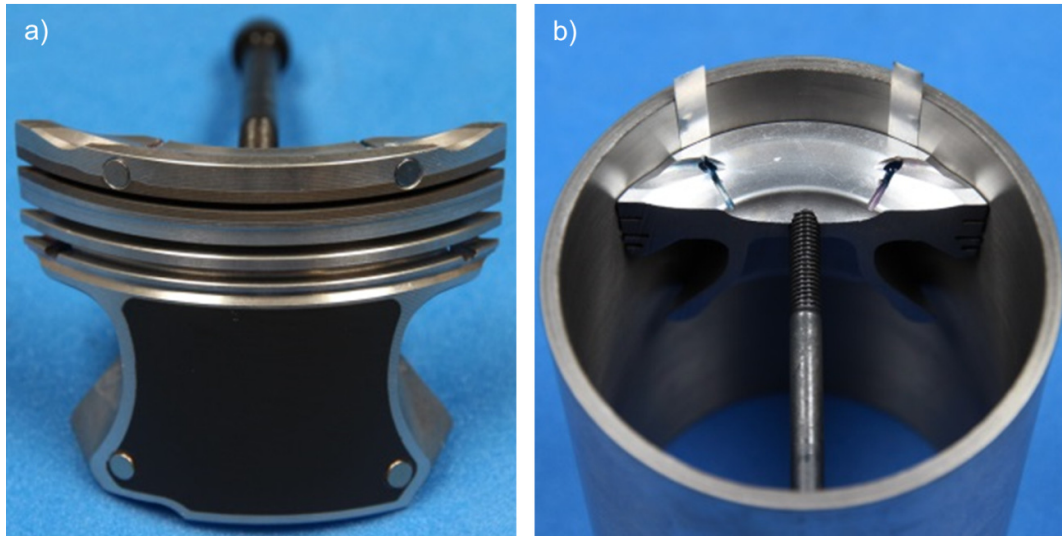


Abbildung 120: Kalibriersegment Einzylindermotor: a) Frontalansicht der Kolbenflanke. Vier Magnete ermöglichen die Anbringung von Präzisionsfolien zur Justierung des Abstandes zur Zylinderwand. b) Kalibriersegment mittels Schraube im Zylinderrohr verspannt und Präzisionsfolien appliziert

Abbildung 121 a zeigt die Seitenansicht des Kalibriersegments.

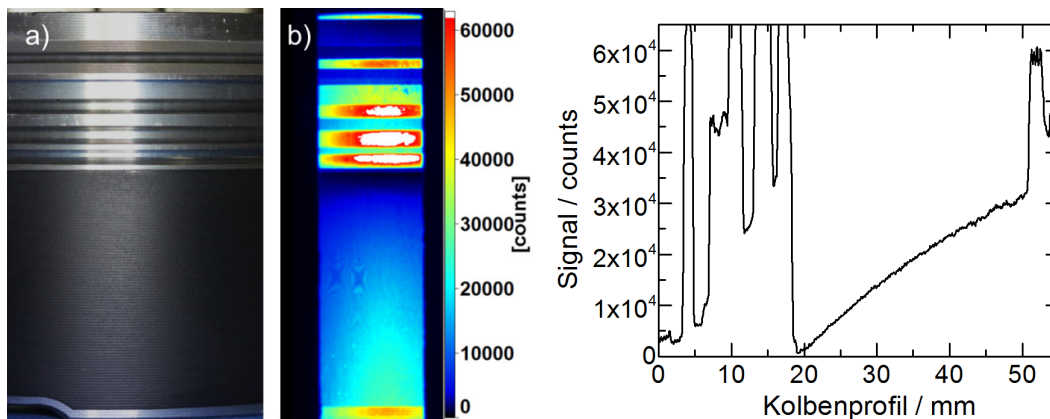


Abbildung 121: a) Seitenansicht Kolbens, b) LIF-Bild des Kolbenprofils ohne Kolbenringe
Abbildung 122: LIF-Signal entlang des Kolbenprofils ohne Kolbenringe

Um den Wärmeeintrag in die Kolbenoberseite während des Motorbetriebs zu kompensieren, ist der Kolben mit einem Drehprofil versehen, das von einer idealen Zylinderform erheblich abweicht. Zudem ist der Kolbendurchmesser kleiner als der Zylinderdurchmesser. Ein gleichmäßiges Anliegen des Kolbens über die gesamte Fensterfläche ist somit nicht zu erreichen, was sich in einer ungleichmäßigen Verteilung des Öls zwischen Kolben und Saphirfenster auswirkt. Abbildung 121 b zeigt die Aufnahme des Ölfilms mit der optischen Messtechnik ohne den Einsatz von Präzisionsfolien. Die deutlichen Filmdickenunterschiede sind vor allem im Bereich des Kolbenhemdes gut zu

erkennen. Abbildung 122 zeigt einen Linienschrieb des LIF-Signals entlang der Kolbenflanke. Im Bereich des Kolbenhemds variiert das Signal um über 30000 counts.

Die Kalibriermessungen zeigen, dass sich durch die Balligkeit der Kolbenkontur der Abstand zwischen dem Kalibriersegment und den Saphirfenstern nicht präzise variieren lässt. Die Ermittlung des Kalibrierfaktors auf den Aluminiumflächen 1 und 2 sind in Abbildung 123 und Abbildung 124 dargestellt. Bei der Applikation der Präzisionsfolien steigender Dicke sinkt das Fluoreszenzsignal anfangs bzw. es bleibt nahezu konstant. Dies lässt sich durch ein Verkippen des Segments durch die Präzisionsfolien erklären. Die Auflagepunkte des Segments ändern sich, ehe die Ölschicht an der Messstelle tatsächlich dicker wird. Bei der Ermittlung des Kalibrierfaktors müssen diese Effekte berücksichtigt werden. Dies erfolgt durch Auswahl des Vertrauensbereichs, in dem die lineare Regression angelegt wird.

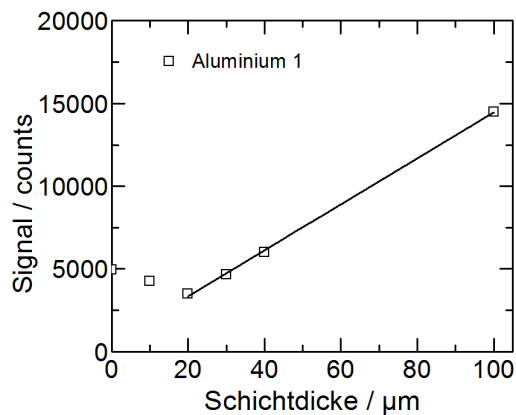


Abbildung 123: Kalibrierung Kolben Grundmaterial „Aluminium 1“

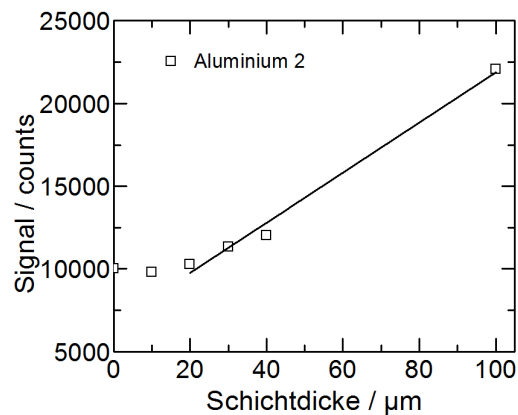


Abbildung 124: Kalibrierung Kolben Grundmaterial „Aluminium 2“

Die in Abbildung 123 dargestellte Messung zeigt zuerst einen deutlichen Abfall des Fluoreszenzsignals, ehe es kontinuierlich ansteigt. Der Wendepunkt bei 20 μm wird als Beginn des realen Filmdickenanstiegs interpretiert. Entsprechend wird die lineare Regression angesetzt. Dieses Vorgehen wird bei allen Messungen angewendet.

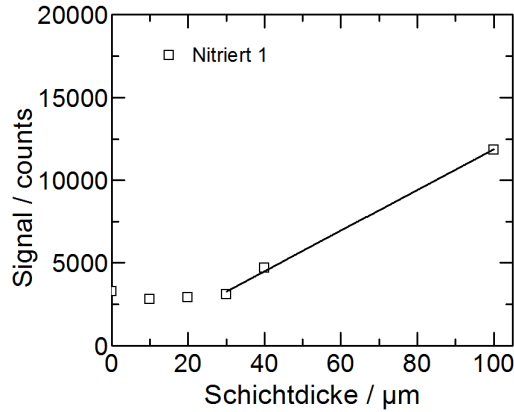


Abbildung 125: Kalibrierung Ringnutmaterial „Nitriert 1“

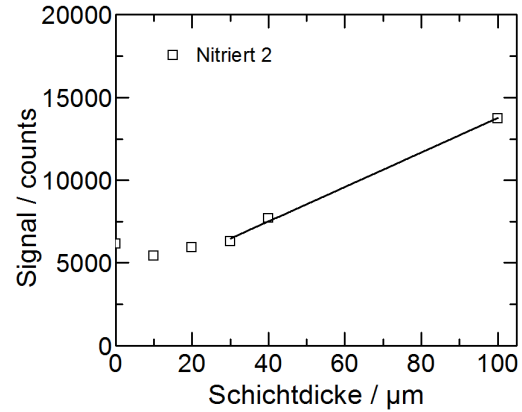


Abbildung 126: Kalibrierung Ringnutmaterial „Nitriert 2“

Abbildung 125 und Abbildung 126 zeigen das Verhalten des Fluoreszenzsignals in der Ringnut. Auch hier ist der reale Anstieg der Filmdicke erst beim Einsatz dickerer Präzisionsfolien erkennbar. Bei der Ermittlung der Kalibrierfaktoren im Bereich des Kolbenhemds wirkt sich der erhebliche Höhenunterschied im Drehprofil zwischen den beiden Messstellen auf das Signalniveau am Messpunkt „Kolbenhemd 2“ aus, siehe Abbildung 128.

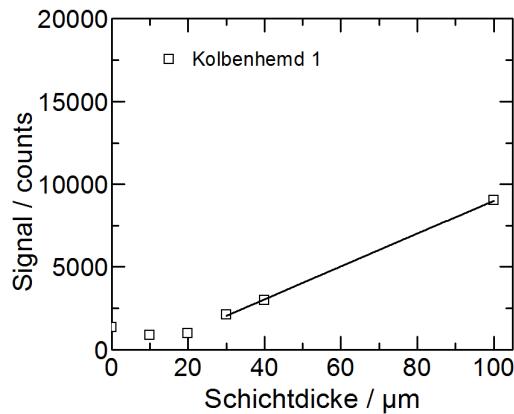


Abbildung 127: Kalibrierung Kolbenhemd 1

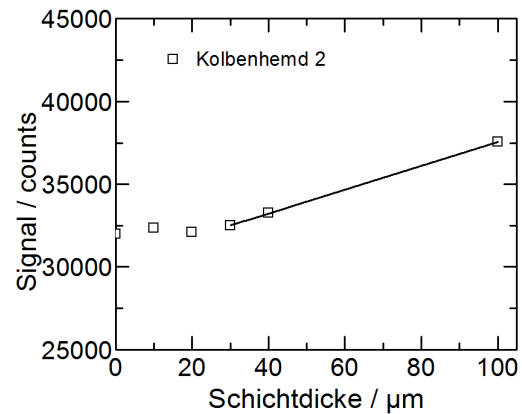


Abbildung 128: Kalibrierung Kolbenhemd 2

Dieses ist im Vergleich zu den übrigen Messpunkten aufgrund der zusätzlichen Ölfilmdicke um etwa 30000 counts erhöht. Die Auswertung der einzelnen Kalibrierkurven zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Ergebnisse Ermittlung der Kalibrierfaktoren

Material	Steigung counts/ μm	Standardabweichung counts/ μm
1. Kolbenring	138,2	18,9
2. Kolbenring	107,9	5,0
Aluminium 1	139,0	2,3
Aluminium 2	151,4	10,9
Nitriert 1	122,9	4,6
Nitriert 2	104,4	4,8
Kolbenhemd 1	99,4	2,0
Kolbenhemd 2	72,1	0,8

Der 1. Kolbenring ist verchromt, dazu passt die größere Signalsteigung im Vergleich zum 2. Kolbenring, der aus geschwärztem Gusseisen besteht. Die Signalsteigung der Aluminiumflächen 1 und 2 des Kolben Grundmaterials ist deutlich größer als diejenige über der nitrierten ersten Ringnut. Die graphithaltige Beschichtung des Kolbenhemds weist die geringste Signalsteigung auf. Die Ergebnisse decken sich mit den Erwartungen, die Kalibriermethode ist jedoch verbesserungsfähig, etwa durch die Anfertigung eines zylindrischen Kalibriersegments mit dem exakten Innendurchmesser der Zylinderbohrung.

6.2.3 Abschätzung der Messgenauigkeit

Die guten Ergebnisse bei der quantitativen Bestimmung der Ölfilmicken mit dem phasengekoppelten System am RRV-Kolbenringtribometer schaffen in Bezug auf die Messgenauigkeit einen Referenzfall für die Anwendung des Systems am optisch zugänglichen Einzylindermotor. Bezüglich der Eigenschaften der Kamera und des Lasers gelten hier die in Abschnitt 5.2.3 angestellten Überlegungen. Unterschiede ergeben sich jedoch bei der Ermittlung der Kalibrierfaktoren sowie der Flachfeldkorrektur. Im Flachfeld sind Intensitätsunterschiede von bis zu 60 – 100% erkennbar (Abbildung 116). Der Flachfeldkorrektur kommt somit für eine quantitative Messung im gesamten Fensterbereich große Bedeutung zu. Die Bestrahlungsstärke von 0,01 – 0,02 mJ/mm² ist im Vergleich zur Bestrahlungsstärke am Tribometer (0,3 mJ/mm²) sehr gering. Sättigungseffekte sind somit deutlich weniger ausgeprägt, siehe Abbildung 41. Dies erlaubt die Ermittlung des Flachfelds mit dem vollständig mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllten Zylinder ohne anschließende Korrektur von Sättigungseffekten. Der zu erwartende Messfehler durch die Flachfeldkorrektur ist somit gering.

Problematischer als bei den Messungen am Tribometer ist die Ermittlung der Kalibrierfaktoren. Der Kolben weist eine Reihe unterschiedlich reflektierender Oberflächen auf, die jeweils einen unterschiedlichen Kalibrierfaktor erfordern. Durch die komplexe Kolbenform ist die Erzeugung eines exakt definierten Kalibrierspalts durch Verkippen des Kolbens, anders als bei den Messungen am Tribometer, nicht möglich. Die Kolbenform erlaubt keine definierten Anlagepunkte. Daher wurde versucht, den Abstand eines Kolbensegments zum optischen Zugang und damit die Ölfilmdicke insgesamt zu verändern. Dazu wurden Präzisionsfolien auf beiden Seiten des Fensters zwischen Kolbensegment und Zylinderwand eingesetzt. Auch hier führt die von einer idealen Zylinderform abweichende Kolbenform teilweise zu einem undefinierten Anstieg der Ölfilmdicke mit entsprechend hohen Messunsicherheiten, siehe Tabelle 15. Der Wert für Aluminium variiert um 8,5%, der Wert für nitriertes Aluminium um 16,3% und der Wert für das beschichtete Kolbenhemd um 31,8%. Hier besteht Optimierungsbedarf. Eine In-situ-Kalibrierung ähnlich dem Vorgehen am RRV-Kolbenringtribometer ist dabei erstrebenswert. Dazu wird das LIF-Signal mit der bekannten Kolbenkontur verglichen. Besonders vielversprechend ist dieser Ansatz bei einem vergrößerten Abbildungsmaßstab, wenn die Rillenstruktur des Kolbens zur Kalibrierung herangezogen werden kann.

Der im befeuerten Betrieb zu erwartende erhebliche Temperaturgradient im Bereich der Kolbenflanke wirkt sich ebenfalls negativ auf die Messgenauigkeit aus. Anders als am RRV-Kolbenringtribometer, dessen Kolbenringsegment-Temperatur während der Messung konstant ist, variiert die Temperatur an der Kolbenflanke von etwa 100°C am Kolbenhemd bis zu 400°C im Feuerstegbereich. Wie in Abbildung 91 erkennbar, sinkt das Fluoreszenzsignal auch mit der „Emission-reabsorption“-Technik bei Temperaturen über 80°C kontinuierlich ab. Eine In-situ-Kalibrierung des lokalen Fluoreszenzsignals würde auch hier helfen, die Messgenauigkeit zu erhöhen.

Im Schleppbetrieb wird die Messunsicherheit hauptsächlich durch die Unsicherheit bei der Ermittlung der Kalibrierfaktoren bestimmt. Diese variiert von etwa 5% beim 2. Kolbenring bis über 30% am Kolbenhemd. Im gefeuerten Betrieb ist vor allem auf Grund des nicht bekannten Temperaturprofils des Kolbens und der nicht bekannten Fluoreszenzintensität der Farbstoffmischung oberhalb von 140°C mit einer größeren Messunsicherheit zu rechnen, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht quantifiziert werden kann. Die Aufnahmen des folgenden Funktionstests werden daher unkalibriert dargestellt.

6.2.4 Funktionstest der LIF-Messung

Um die Funktionsfähigkeit des optischen Zugangs im Motorbetrieb zu überprüfen und die Qualität der LIF-Aufnahmen zu beurteilen, wurde die optische Messtechnik einem Probelauf unterzogen. Dazu wurde ein thermisch-mechanisch wenig beanspruchender Betriebspunkt von 900 1/min im Schleppbetrieb gewählt. Abbildung 129 zeigt das typische Bild während der Messung.

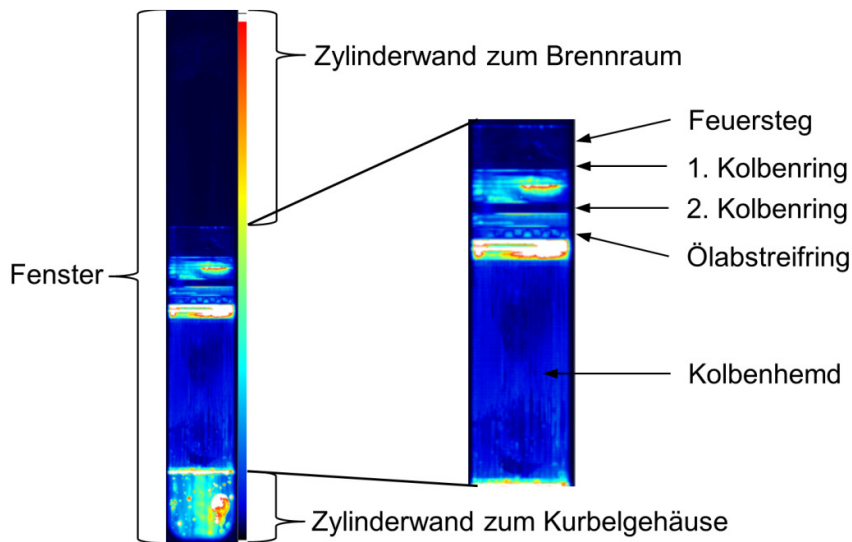


Abbildung 129: Sichtfeld bei der Ölmessung

Das gesamte Saphirfenster liegt im Sichtfeld. Die Aufnahme wird bei einem Kurbelwinke von 430° KW ausgelöst und zeigt in etwa die Mitte des Saughubs auf der Gegen-druckseite. Im oberen Bereich ist die Zylinderwand des Brennraums zu sehen. Aufgrund der dünnen Ölschicht auf der Zylinderwand ist das Signalniveau in diesem Bereich gering. Der Kolben befindet sich etwas unterhalb der Bildmitte. Im Bereich des Feuerstegs befindet sich nur wenig Öl. Direkt unterhalb des Feuerstegs schließt sich das Ringfeld an. Zwischen den beiden ersten Kolbenringen erkennt man deutlich das dort angesammelte Öl, das durch die Blowby-Strömung beeinflusst wird. Der Ölabstreifring ist an der gewellten Lamelle aus Federstahl zu erkennen. Direkt unter dem Ölabstreifring befindet sich eine große Menge Öl, das durch die Abstreifwirkung des Kolbenrings dort deponiert wird. Darunter schließt sich das Kolbenhemd an, auf dem sich das Öl ungleichmäßig verteilt. Die Zylinderwand unterhalb des Kolbens wird durch die Ölspritzdüse reichlich mit Schmieröl benetzt, daraus resultiert ein hohes Fluoreszenzsignal in diesem Bereich. Die unterschiedliche Signalstärke auf der Zylinderwand ober- und unterhalb des Kolbens zeigt sehr gut die Dichtfunktion des Kolbenringpakets und dessen ölabstreifende Wirkung.

Um den Effekt unterschiedlicher Betriebsparameter auf die Ölverteilung in der Kolben-gruppe zu demonstrieren, wurde die Drosselklappe während einer Bildserie geschlossen. Das Ergebnis dieses Versuchs zeigt Abbildung 130.

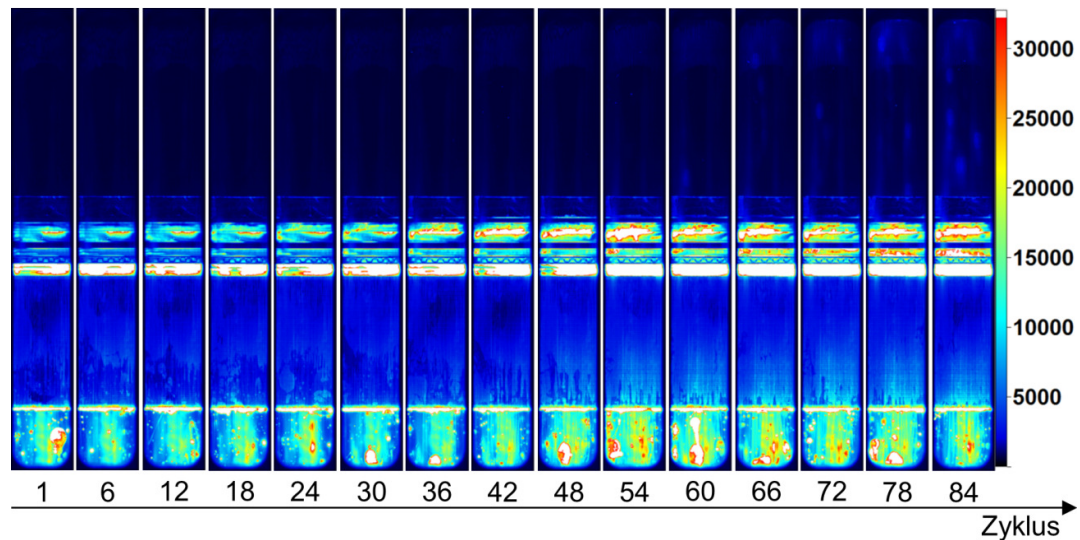


Abbildung 130: Ölverteilung in der Kolbengruppe bei sinkendem Saugrohrdruck bei 420° Kurbelwinkel im Saughub

Zyklus 1 zeigt die Ölverteilung bei voll geöffneter Drosselklappe. Diese wird nun vollständig geschlossen. Dadurch sinkt der Saugrohrdruck und die Blowby-Strömung reduziert sich stark. Da diese jedoch für den Abtransport von überschüssigem Öl aus der Kolbengruppe mitverantwortlich ist, erhöht sich das Ölangebot in derselben. Dies ist deutlich im Bereich des Pleuellagers zu sehen, dessen benetzte Fläche im Verlauf der Messung stark zunimmt. Dies gilt gleichermaßen für den Bereich des Pleierrings. Dieser wird vollständig mit Öl gefüllt, was zu einer zunehmenden Abdichtung und damit weiteren Reduzierung der Blowby-Strömung beiträgt. Die Ölsammlung im Bereich der Ringstege wird ab dem 36. Zyklus augenscheinlich nicht mehr durch Gasströmungen beeinflusst. Ab diesem Zeitpunkt deutet die Ölsammlung oberhalb des 1. Pleierrings darauf hin, dass Öl aufgrund des steigenden Ölangebots durch die Ringnut in den Pleierringbereich gelangt. Sobald die Ölmenge ausreichend groß ist, um die Zylinderwand zu erreichen, wird diese benetzt, was ab Aufnahme 60 in Form von Ölsammlungen oberhalb des Pleierrings deutlich zu erkennen ist.

Der Funktionstest zeigt das Potential der LIF-Technik bei der Analyse der Vorgänge in der Kolbengruppe. Neben der qualitativen Untersuchung der Ölverteilung bietet die prinzipiell nachgewiesene Quantifizierbarkeit der Messung zusätzliche Informationen zu Ölfilmdicken. Diese können beispielsweise als Eingangsdaten für Simulationsmodelle oder zur Quantifizierung der Öltransportvorgänge dienen.

6.2.5 Vorversuch Kraftstoffmessung

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, hat Eintrag von Kraftstoff in die Kolbengruppe einen großen Einfluss auf das Funktionsverhalten des Verbrennungsmotors. Gelangt Kraftstoff auf die Zylinderwand, kann dieser ins Motoröl gelangen und führt so zu Ölverdünnung bzw. zu Ölschädigung. Zudem steigen durch die daraus resultierende unvollständige Verbrennung die Schadstoffemissionen und es besteht die Gefahr der Auslösung von Vorentflammungen. Die direkte Messung, in welchem Betriebspunkt Kraftstoff an die Zylinderwand gelangt, fehlt bisher. Einzig indirekte Methoden, wie die Analyse des Kraftstoffgehalts im Motoröl oder der Abgaswerte, stehen zur Optimierung der Einspritzparameter zur Verfügung. Der optische Zugang des Einzylindermotors bietet ideale Voraussetzungen, Kraftstoffeintrag unmittelbar zu erkennen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Für die Visualisierung von Kraftstoffschichten wurden in der Vergangenheit verschiedene Fluoreszenzmarker aus der Stoffgruppe der Ketone in Kombination mit einem UV-Laser eingesetzt [76] oder die natürliche Fluoreszenz von Kraftstoff bei der Anregung mit UV-Licht ausgenutzt [77, 79, 80], siehe Abschnitt 3.1.2. Um das bestehende optische System mit einer Anregungswellenlänge von 532 nm auch für die Kraftstoffmessung einsetzen zu können, wurde versucht, die für die Ölfilmdickenmessung verwendeten Fluoreszenzfarbstoffe in Kraftstoff zu lösen. Hierzu wurde jeweils 0,1 mmol/l des Farbstoffs in verschiedene Lösungsmittel eingebracht, siehe Tabelle 16.

Tabelle 16: Löslichkeit und Fluoreszenzintensität der Laserfarbstoffe in verschiedenen Lösungsmitteln

Farbstoff	Lösungsmittel	Löslichkeit	Fluoreszenzsignal
Rhodamin 640	Ethanol	++	–
	iso-Oktan	– –	– –
	E10 Kraftstoff	O+	O
Pyrromethen 567	Ethanol	O+	++
	iso-Oktan	O+	+
	E10 Kraftstoff	+	++

Außer Rhodamin, das sich nicht in Iso-Oktan lösen lässt, weisen alle getesteten Kombinationen eine gewisse Löslichkeit auf. Das Fluoreszenzsignal des in E10 Kraftstoff gelöstem Pyrromethen 567 ist am stärksten. Daher wurde diese Kombination für den Versuch ausgewählt.

Um eine Überlagerung von Kraftstoff- und Ölsignal zu vermeiden, wurde für die Kraftstoffmessung das Motoröl nicht fluoreszenzmarkiert. Die Motordrehzahl betrug

1500 1/min und der Motor wurde im entdrosselten Saugbetrieb gefeuert. Die für ein stöchiometrisches Kraftstoff-Luft-Verhältnis notwendige Kraftstoffmenge wurde während des Saughubes bei 420°KW mittels Direkteinspritzung eingebracht. Die Aufnahme erfolgte jeweils einmal pro Arbeitstakt am Ende des Saughubes bei 540°KW. Um übermäßige Ansammlung von fluoreszenzmarkiertem Kraftstoff im Brennraum zu vermeiden, wurde der Motor im Schleppbetrieb auf Versuchsdrehzahl gefahren und die Einspritzung wenige Takte vor Beginn der Aufnahmen eingeschaltet. Abbildung 132 zeigt das typische Bild während der Messung.

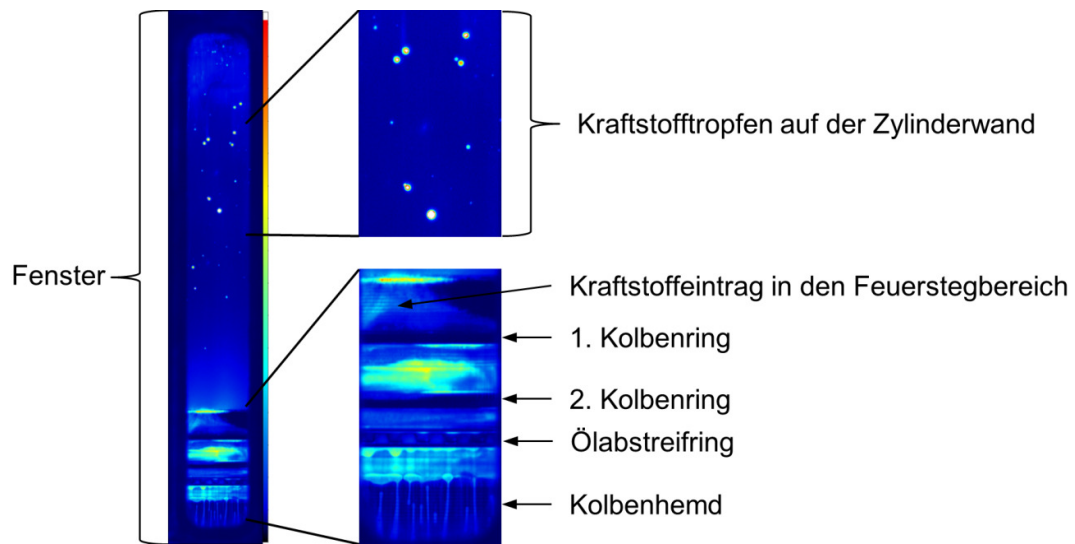


Abbildung 131: Sichtfeld bei der Kraftstoffmessung

Durch die Aufnahme am Ende des Saughubes steht der Kolben nahe dem unteren Totpunkt. In der oberen Bildhälfte sieht man Kraftstofftropfen, die die Zylinderwand erreichen. Je nach Winkel und Geschwindigkeit des Aufpralls auf die Zylinderwand, hinterlassen die Tropfen eine Spur auf der Zylinderwand an deren Ende sich die restliche Kraftstoffmenge in Form eines Tropfens befindet. Große Tropfen sind auf der Zylinderwand auch nach einem kompletten Motorzyklus noch als Spur zu erkennen, obwohl die Kolbenringe mehrfach über die Stelle geglitten sind. Durch den stetigen Eintrag von fluoreszenzmarkiertem Kraftstoff sind die Kolbenkonturen auch ohne fluoreszenzmarkiertes Öl erkennbar. Alle Kolbenringe sind im Bild zu erkennen. Der Eintrag von Kraftstoff in die Kolbengruppe erfolgt über den Feuerstegbereich unterstützt von der Blowby-Strömung in Richtung Kurbelgehäuse. Eine größere Menge Kraftstoff reichert sich zwischen dem 1. und 2. Kolbenring an. Um diesen Vorgang zeitlich einordnen zu können, wurde eine Serie von Aufnahmen untersucht, siehe Abbildung 132.

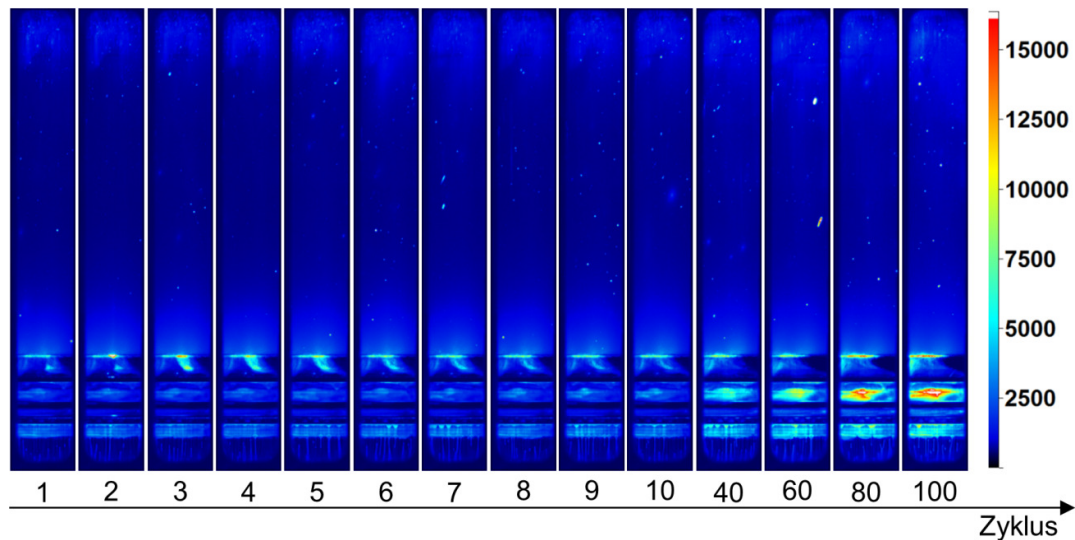


Abbildung 132: Vorversuch Kraftstoffeintrag

Bei Vorversuchen wurde bereits eine geringe Menge fluoreszenzmarkierter Kraftstoff eingespritzt. Dieser hatte Gelegenheit sich in der Kolbengruppe zu verteilen, daher ist im ersten untersuchten Zyklus bereits ein geringes Signal sichtbar. Mit Einschalten der Einspritzung erreichen Kraftstofftropfen die Zylinderwand oberhalb des Kolbens. In Zyklus 3 ist ein Kraftstofftropfen gerade in den Feuerstegbereich eingedrungen. Die Blowby-Strömung treibt ihn in den darauf folgenden Zyklen weiter in den Feuerstegbereich hinein. Ein mögliches Verdampfen des Kraftstoffs während dieses Transportvorgangs kann jedoch nicht sichtbar gemacht werden, da der fluoreszierende Farbstoff nicht verdampft. Währenddessen gelangen weitere Kraftstofftropfen auf die Zylinderwand. Der fluoreszenzmarkierte Kraftstoff wird durch die Hubbewegung zwischen den Aufnahmen vom Ölabstreifring eingesammelt, was zu einem stetig steigenden Fluoreszenzsignal unterhalb des Abstreifrings führt. Ein ebenfalls ansteigendes Fluoreszenzsignal zwischen dem 1. und 2. Kolbenring deutet darauf hin, dass fluoreszenzmarkierter Kraftstoff aus dem Feuerstegbereich durch die Ringnut des 1. Kolbenrings dorthin gelangt. Der Bereich unterhalb des 2. Kolbenrings zeigt nur einen leichten Anstieg der Fluoreszenzintensität. Hier scheint der fluoreszenzmarkierte Kraftstoff nicht den Weg durch die Kolbenringnut zu suchen. Eine Erklärung für dieses Verhalten ist der deutlich niedrigere Druckgradient über den 2. Kolbenring im Vergleich zum 1. Kolbenring.

Dieser Grundlagenversuch zeigt das Potential der Kraftstoffmessung bei der Analyse der Kraftstoff-Transportvorgänge in der Kolbengruppe, die zu Ölverdünnung und einer Beeinflussung der Verbrennung führt. Die unzureichende Abbildung von Verdampfungsvorgängen bei der Fluoreszenzmarkierung des Kraftstoffs mit Laserfarbstoffen weckt jedoch den Wunsch nach einer alternativen Methode.

7 Ausblick

Die Quantifizierbarkeit der Messung wurde sowohl am Tribometer als auch am optisch zugänglichen Einzylindermotor nachgewiesen. Die Ermittlung der Kalibrierfaktoren am Einzylindermotor mittels Kalibriersegment kann jedoch weiter verbessert werden. Durch das Drehprofil des Kolbens liegt das aus dem Serienkolben gefertigte, bisher genutzte Kalibriersegment, nicht gleichmäßig auf der Fensteroberfläche an. Dies erschwert die Einstellung einer definierten Ölfilmdicke für die Kalibriermessung. Für die weiteren Arbeiten wäre die Anfertigung eines exakt zylindrischen Kolbens, aus dem dann ein geeignetes Kalibriersegment herausgearbeitet werden kann, sinnvoll. Ein weiterer Ansatz ist die Online-Kalibrierung der Messung während des Versuchs anhand der Bearbeitungsmarken auf dem Kolben. Dieser Ansatz wurde ebenfalls von Thirouard [73] gewählt, der jedoch die unterschiedlichen Reflexionsgrade in der Kolbengruppe nicht mit einbezogen hat. Dieses Verfahren erfordert einen größeren Abbildungsmaßstab, so dass nicht mehr der gesamte Fensterbereich während der Messung abgebildet werden kann. Vorteilhaft wäre es, in zukünftigen Arbeiten Temperatureffekten auf die Fluoreszenzintensität einerseits zur Temperaturmessung zu nutzen und andererseits dadurch die Temperaturabhängigkeit der Messung zu reduzieren.

Eine zentrale Rolle bei der Weiterentwicklung der Messtechnik wird die Kraftstoffmessung spielen. Erste Ergebnisse zeigen das große Potential bei der Visualisierung des Kraftstoffs in der Kolbengruppe, berücksichtigen jedoch nicht die Verdampfung des Kraftstoffs während der Messung. Hentschel [77] zeigt, dass die Aufkonzentration von Fluoreszenzmarkern bei verdampfenden Flüssigkeitsfilmen zu Messfehlern und damit möglicherweise zu Fehlinterpretationen der Messergebnisse führt. Der Einsatz eines proportional mit dem Kraftstoff verdampfenden Fluoreszenzmarkers würde hier das Optimum darstellen.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messtechnik bietet die Möglichkeit, tribologische Effekte im Schmierpalt und Transportvorgänge in der Kolbengruppe zur analysieren. Eine umfassende Detailanalyse der einzelnen Vorgänge sowie der Abgleich der Messergebnisse mit entsprechenden Rechenmodellen war außerhalb des Rahmens dieser Arbeit und bietet Raum für zukünftige Arbeiten.

8 Zusammenfassung

In der Entwicklung kleinerer und effizienterer Verbrennungsmotoren steigt die Leistungsdichte durch den Einsatz von Technologien wie Direkteinspritzung und Aufladung stetig. Daraus resultierende Effekte wie erhöhte Zylinderdrücke oder Kraftstoff-Wandbenetzung wirken sich auf die Kolbengruppe aus, die den Brennraum beweglich abdichtet und dabei zu einem Großteil der Reibungsverluste im Motor beiträgt. Die Kolbengruppe steht daher im Spannungsfeld zwischen optimaler Dichtfunktion und niedrigen Reibwerten und ist so eine Schlüsselkomponente bei der Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors. Hier interagieren die drei Fluide Motoröl, Leckage-Gas (Blowby) und Kraftstoff unter ständig wechselnden Temperatur- und Druckbedingungen. Das Betriebsverhalten kann daher durch die Auslegung der Kolbengruppe entscheidend beeinflusst werden. Aufgrund des hohen Komplexitätsgrades ist bisher eine umfassende Vorhersage des Systemverhaltens unmöglich.

Ziel der Arbeit war es, eine Messmethode zur quantitativen Erfassung der Ölverteilung in der Kolbengruppe zu entwickeln. Optische Messtechnik bietet die Möglichkeit, die Vorgänge in der Kolbengruppe sichtbar zu machen und berührungslos zu untersuchen. Die Methode der Schichtdickenmessung mittels laserinduzierter Fluoreszenz ermöglicht zudem die Quantifizierung der Ölfilmdicke im tribologischen Kontakt und wurde daher als Messmethode gewählt. Öl wurde dazu in Spuren mit Laserfarbstoffen, hier im Wesentlichen Pyrromethen 567 und Rhodamin 640, versetzt. Die Farbstoffe wurden mit einem Nd:YAG-Laser bei 532 nm angeregt und das Fluoreszenzlicht mittels einer CMOS-Kamera zweidimensional abgebildet. Dieses Messsystem erlaubte phasengekoppelte Aufnahmen mit einer Repetitionsrate von maximal 100 Hz.

Die Applikation der Messtechnik an einem Kolbenringtribometer ermöglichte die detaillierte Untersuchung der Vorgänge im Schmierspalt. Ein optisch zugänglicher Einzylinderomotor bot die Möglichkeit, die Vorgänge in der Kolbengruppe insgesamt zu beobachten. Um die Auswirkungen der dafür notwendigen optischen Zugänge auf das tribologische System zu ermitteln, wurden die Benetzungswinkel von Motoröl auf eisenbasierten Laufbahnmaterialien sowie Quarzglas und Saphir untersucht. Die Messungen zeigten ein vergleichbares Verhalten des Schmiermittels auf der Oberfläche. Ergänzend durchgeführte Reibwertmessungen an einem Kolbenringtribometer bestätigten vergleichbare tribologische Eigenschaften von Quarzglas und Grauguss.

Um die quantitative Messung der Ölfilmdicke zu ermöglichen, wurden zu Beginn der Arbeit die Eigenschaften des optischen Systems mit Hilfe einer Kalibriervorrichtung untersucht. Diese erlaubt es, mit Hilfe eines Stempels Ölfilme definierter Dicke und Temperatur einzustellen. Als Ergebnisse dieser Kalibriermessungen wurde bestätigt, dass die Fluoreszenzintensität bis zu einer definierten Farbstoffmenge als linear abhängig von der Farbstoffmenge in beobachteten Bereich angesehen werden kann.

Dabei ist es unerheblich, ob die Farbstoffmenge über eine dickere Ölschicht oder eine höhere Farbstoffkonzentration in der Schicht variiert wird. Der nutzbare Schichtdicken-Messbereich ist somit durch Variation der Farbstoffkonzentration wählbar. Bei hohen Intensitäten des Anregungslichts tritt eine Sättigung der Fluoreszenz auf, die das lineare Verhalten von Schichtdicke und Fluoreszenzintensität für geringe Farbstoffkonzentrationen bzw. dünne Schichten jedoch nicht beeinflusst. Der Einfluss des Reflexionsgrades des Materials auf dem sich die zu beobachtende Schicht befindet, konnte durch Messungen mit verschiedenen Kalibrierstempeln bestätigt werden. Die Signalsteigung bei der Verwendung eines Aluminiumstempels verdoppelt sich in etwa im Vergleich zu einem Quarzglasstempel. Die Oberflächenrauigkeit hatte jedoch nur geringfügigen Einfluss auf das Fluoreszenzsignal. Im Versuch wurde der Einfluss des Reflexionsgrades durch eine In-situ-Kalibrierung mit dem jeweiligen Versuchsmaterial an der Messstelle berücksichtigt. Mittels Präzisionsfolien wurde ein ölfüllter Spalt mit definierter Geometrie erzeugt, dessen Fluoreszenzsignal ausgewertet wurde.

Die Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz-Intensität konnte durch die Kombination zweier Fluoreszenzfarbstoffe und einem Bandpassfilter deutlich reduziert werden. Bezogen auf das nicht stabilisierte Fluoreszenzsignal reduzierte sich der Verlust der Fluoreszenzintensität auf 5% bei 80 °C und 21% bei 140 °C. Durch den Einsatz einer Flachfeld-Korrektur gelang die zweidimensionale Quantifizierung der Instrumentenfunktion des Messsystems, die im Wesentlichen durch die Laser-Intensitätsverteilung geprägt ist. Die Auswertung der Ölverteilung im gesamten Messfeld wurde so ermöglicht. Durch eine Vergleichsmessung konnte gezeigt werden, dass zur korrekten Wiedergabe der Laser-Intensitätsverteilung nicht notwendigerweise eine aufwendig herzustellende geringe Schichtdicke erforderlich ist. Die Laser-Intensitätsverteilung wird auch von einer sehr dicken Schicht korrekt wiedergegeben, die das Anregungslicht vollständig absorbiert. Sättigungseffekte, die aufgrund von sehr hohen Bestrahlungsstärken während der Messung auftreten könnten, wurden durch eine Korrekturfunktion berücksichtigt.

Die Applikation der Messtechnik am Kolbenringtribometer lieferte wertvolle Informationen zum Verständnis der Fluidodynamik im Schmierpalt. In Kombination mit der quantitativen Analyse der Ölfilmdicke über einen weiten Bereich von Gleitgeschwindigkeit und Normalkraft vervollständigte sich das Bild. Der optische Zugang erfolgte durch einen Quarzglaszylinder. Die Ölfilmdicke zwischen Kolbenring und Zylinderwand wurde in Abhängigkeit von Normalkraft und Gleitgeschwindigkeit zu 0,5-3,5 µm mit einer Messgenauigkeit von 0,1 µm bestimmt. Durch die Analyse der Ölverteilung bestätigte sich die erwartete abnehmende Ölfüllung des Schmierpalts mit steigender Gleitgeschwindigkeit. Im Bereich ab etwa 8 m/s wurde ein instabiles Verhalten des Ölfilms festgestellt. Dieses konnte durch den Einsatz eines weiterentwickelten hochrepetitiven Messsystems zeitlich aufgelöst und analysiert werden. Die Entwicklung des Messsystems basierte auf den Erkenntnissen mit dem phasengekoppelten System und erlaubt eine Repetitionsrate von bis zu 20 kHz. Mit Hilfe dieses Messsystems wurden Öltrans-

portvorgänge auf dem Kolbenring sichtbar gemacht, die im Bereich des instabilen Ölfilms auftreten.

Ergänzend zur direkten Beleuchtung des Schmierpalts wurde eine spezielle Lichtführung zur Ausnutzung von Totalreflexion eingesetzt. Diese ermöglichte es, nur am Zylinder anhaftendes Öl sichtbar zu machen. Der Einfluss der Ölzufuhr auf das instabile Schmierfilmverhalten konnte durch den Vergleich zweier Beölungssysteme untersucht werden. Es zeigte sich, dass sich über eine Kapillare lokal zugeführtes Öl deutlich schlechter im Schmierpalt verteilt als angenommen. Die Erkenntnisse dieser Messung wurden zur Weiterentwicklung der Ölversorgung des Tribometers verwendet. Der Grund für das instabile Verhalten des Schmierfilms wurde in einer ungleichmäßig mit Öl benetzten Zylinderwand hinter dem Reibkontakt gefunden. Durch die Drehbewegung des Zylindersegments gelangen ungleichmäßig benetzte Laufbahnbereiche wieder in den Schmierpalt, was zu einer Selbstverstärkung der Ölfilm-Instabilität führt.

Der optische Zugang am Einzylindermotor erfolgte über Saphirfenster auf der Druck- und Gegendruckseite des Zylinders. Bei der Applikation der phasengekoppelte LIF-Messtechnik konnten die Erkenntnisse der am Kolbenringtribometer entwickelten In-situ-Kalibrierung prinzipiell übertragen werden. Die zweidimensionale Instrumentenfunktion wurde durch eine vollständige Füllung des Zylinders mit fluoreszenzmarkiertem Öl ermittelt. Die Laser-Intensitätsverteilung variierte über die gesamte Fensterfläche von 60-100%. Zur Kalibrierung der unterschiedlichen Materialien in der Kolbengruppe wurde ein Kalibriersegment aus einem Serienkolben gefertigt, dessen Abstand zum optischen Zugang durch Präzisionsfolien eingestellt wurde. Der mit fluoreszenzmarkiertem Öl gefüllte Spalt wurde zur Ermittlung der Kalibrierfaktoren ausgewertet, die innerhalb der Kolbengruppe um den Faktor zwei abwichen. Mit Hilfe der LIF-Messtechnik konnte das Verhalten des Ölfilms in der Kolbengruppe im transienten Motorbetrieb untersucht werden. Die Untersuchung des Kraftstoffeintrags in die Kolbengruppe ist eine Schlüsselstelle im Verständnis des Transportvorgangs von Kraftstoff in den Ölkreislauf und der Auslösung von Vorentflammungen durch Kraftstoff auf der Zylinderwand bzw. im Feuerstegbereich. Aus diesem Grund wurde die LIF-Messtechnik ebenfalls zur Detektion von Kraftstoff in der Kolbengruppe eingesetzt. Dazu wurden die Löslichkeit und Fluoreszenzintensität der Laserfarbstoffe in üblichen Kraftstoffen untersucht. Mit Pyrromethen 567 versetzter E10-Kraftstoff wurde als geeignet für die Untersuchung ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass Kraftstofftropfen im gefeuerten Betrieb die Zylinderwand erreichen. Durch die Hubbewegung des Kolbens gelangt dieser Kraftstoff in das Kolbenringfeld und akkumuliert sich dort. Das Potential der LIF-Technik in Kombination mit optischen Zugängen in der Zylinderwand konnte so aufgezeigt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Methode der laserinduzierten Fluoreszenz zur Analyse von Öl- und Kraftstoffschichten sowohl bei der Anwendung in Tribometer-Versuchen als auch am optisch zugänglichen Einzylindermotor gute Ergebnisse liefert. Der Einfluss des optischen Zugangs auf das tribologische Systemver-

halten ist dabei als gering einzuschätzen. Durch die Berücksichtigung des Reflexionsgrades durch eine In-situ-Kalibrierung konnte die Quantifizierung der Messung im Vergleich zu bestehenden Arbeiten verbessert werden. Zur Ermittlung der zweidimensionalen Systemantwort wurde mit der vollständige Füllung des Messbereichs mit fluoreszenzmarkiertem Öl eine neue Methode etabliert. Die Ergebnisse der Messungen tragen zum Verständnis der Vorgänge in der Kolbengruppe bei und helfen, entsprechende Modelle abzugleichen. Mit dem optisch zugänglichen Motor steht nun ein Versuchsträger zur Verfügung, der für weitere Untersuchungen vielfältig nutzbar ist.

Literaturverzeichnis

1. Czichos, H., *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen*, 1. Auflage, Expert-Verlag, Grafenau 1982
2. Gesellschaft für Tribologie, *GFT Arbeitsblatt 7*, Moers 2002
3. Jacobs, G., *Tribologie Vorlesungsumdruck*, 6. Auflage, Institut für Maschinenelemente der RWTH Aachen, 2009
4. Hori, Y., *Hydrodynamic Lubrication*, Springer-Verlag, Tokyo 2006
5. Affenzeller, J. und Gläser, H., *Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren*, 8. Auflage, Springer-Verlag, Wien 1996
6. Stribeck, R.J., *Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager*, VDI 46, 1341ff, 1432ff, 1469ff, 1902
7. van Basshuysen, R. und Schäfer, F., *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, Vieweg+Teubner-Verlag, Wiesbaden 2010
8. MAHLE, *Kolben und motorische Erprobung*, 1. Auflage, Vieweg+Teubner-Verlag, Stuttgart 2010
9. Thirouard, B. und Tian, T., *Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part I): Identification and Characterization of the Main Oil Transport Routes and Mechanisms*, SAE Technical Paper 2003-01-1952, 2003
10. Thirouard, B. und Tian, T., *Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part II): Zone Analysis and Macro Oil Transport Model*, SAE Technical Paper 2003-01-1953, 2003
11. Federal-Mogul, *Kolbenring-Handbuch*, Goetze, Burscheid 2003
12. MAHLE, *Zylinderkomponenten: Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe*, 1. Auflage, Vieweg+Teubner-Verlag, Stuttgart 2009
13. Kompa, A., *Untersuchung des tribologischen Verhaltens des Systems Kolbenring gegen Zylinderlauffläche mittels Modelltests*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2003
14. Hahn, M., *Mikrostrukturelle Veränderungen in der Zylinderlaufbahn von PKW Dieselmotoren aus Grauguss und mittels thermischer Spritzverfahren hergestellter Stahlschichten*, VDI-Verlag, Düsseldorf 2013
15. DIN-Norm, *Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung*, DIN EN 657:2005, Beuth-Verlag, Berlin 2005
16. Bach, F.W., Möhwald, K., Laarmann, A. und Wenz, T., *Moderne Beschichtungsverfahren*, Wiley-Verlag, Weinheim 2006
17. Mercedes-Benz Norm, *Honen von Zylinder-Laufflächen*, MBN 37 800-1, Mercedes-Benz, Stuttgart 2008
18. Leonhardt, H., Reders, K., Froböse, E., Müller, H.D., Null, V., Miller, J. und Busse, P., *Shell Motorenöl-Lexikon*, 2004
19. Mauser, H., *Flüssige und konsistente Schmierstoffe für Gleitlager* in: W.J. Bartz, *Gleitlagertechnik*, Teil 1, 211-230, Expert-Verlag, Grafenau 1981

20. Vogelpohl, G., *Betriebssichere Gleitlager: Berechnungsverfahren für Konstruktion und Betrieb*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Wien 1958
21. Luijten, B., Adomeit, P., Brunn, A. und Somers, B., *Experimental Investigation of In-Cylinder Wall Wetting in GDI Engines Using a Shadowgraphy Method*, SAE Technical Paper 2013-01-1604, 2013
22. Costanzo, V.S., *Effect of in-cylinder liquid fuel films on engine-out unburned hydrocarbon emissions for SI engines*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2011
23. Shanta, S.M., Molina, G.J. und Soloiu, V., *Tribological Effects of Mineral-Oil Lubricant Contamination with Biofuels: A Pin-on-Disk Tribometry and Wear Study*, Advances in Tribology 2011, ID 820795, 2011
24. Wattrus, M., *Fuel Property Effects on Oil Dilution in Diesel Engines*, SAE Technical Paper 2013-01-2680, 2013
25. Suck, G., *Untersuchung der HC-Quellen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung*, Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2001
26. Li, J., Matthews, R.D., Stanglmaier, R.H., Roberts, C.E. und Anderson, R.W., *Further Experiments on the Effects of In-Cylinder Wall Wetting on HC Emissions from Direct Injection Gasoline Engines*, SAE Technical Paper 1999-01-3661, 1999
27. Zahdeh, A., Rothenberger, P., Nguyen, W., Anbarasu, M., Schmuck-Soldan, S., Schaefer, J. und Goebel, T., *Fundamental Approach to Investigate Pre-Ignition in Boosted SI Engines*, SAE Technical Paper 2013-01-1604, 2011
28. Amann, M., Alger, T., Westmoreland, B. und Rothmaier, A., *The Effects of Piston Crevices and Injection Strategy on Low-Speed Pre-Ignition in Boosted SI Engines*, SAE Technical Paper 2012-01-1148, 2012
29. Yilmaz, E., Tian, T., Wong, V.W. und Heywood, J.B., *An Experimental and Theoretical Study of the Contribution of Oil Evaporation to Oil Consumption*, SAE Technical Paper 2002-01-2684, 2002
30. Yilmaz, E., *Sources and Characteristics of Oil Consumption in a Spark-ignition Engine*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2003
31. Yilmaz, E., Tian, T., Wong, V.W. und Heywood, J.B., *The Contribution of Different Oil Consumption Sources to Total Oil Consumption in a Spark Ignition Engine*, SAE Technical Paper 2004-01-2909, 2004
32. Froelund, K. und Yilmaz, E., *Impact of engine oil consumption on particulate emissions*, ICAT International Conference on Automotive Technology, Istanbul, Türkei 2004
33. Pischinger, S., *Vorlesungsumdruck Verbrennungskraftmaschinen II*, 26. Auflage, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA), RWTH Aachen, 2007
34. Attard, W.P., Toulson, E., Watson, H. und Hamori, F., *Abnormal Combustion including Mega Knock in a 60% Downsized Highly Turbocharged PFI Engine*, SAE Technical Paper 2010-01-1456, 2010
35. Amann, M. und Alger, T., *Lubricant Reactivity Effects on Gasoline Spark Ignition Engine Knock*, SAE Technical Paper 2012-01-1140, 2012

36. Takeuchi, K., Fujimoto, K., Hirano, S. und Yamashita, M., *Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines*, SAE Technical Paper 2012-01-1615, 2012
37. Yasueda, S., Takasaki, K. und Tajima, H., *Abnormal Combustion Caused by Lubricating Oil in High BMEP Gas Engines*, MTZ Industrial Special Edition, 34-39, 2013
38. Beulshausen, J., Pischinger, S. und Nijs, M., *Drivetrain Energy Distribution and Losses from Fuel to Wheel*, SAE Technical Paper 2013-01-9118, 2013
39. Schommers, J., Scheib, H., Hartweg, M. und Bosler, A., *Reibungsminimierung bei Verbrennungsmotoren*, MTZ Motorentechnische Zeitschrift 07-08/2013, 566-573, 2013
40. Wakuri, Y., Hamatake, T., Soejima, M. und Kitahara, T., *Piston Ring Friction in Internal Combustion Engines*, Tribology International 25, 299–308, 1992
41. Holzer, K.A., *Untersuchungen zum Verschleiss im Zylinder von Verbrennungsmotoren: Eine Sammlung und Besprechung von Versuchen aus allen Gebieten, die mit dem Zylinderverschleiss zusammenhängen*, Oldenbourg-Verlag, München 1952
42. Pischinger, S., *Vorlesungsumdruck Verbrennungskraftmaschinen I*, 26. Auflage, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA), RWTH Aachen, 2007
43. Bölter, J., *Auswirkungen von Ruß im Schmieröl von DI-Dieselmotoren auf das tribologische Verhalten und Tribomutationen von hochbelasteten Motorkomponenten*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2010
44. Orthaber, G.C., *Berechnungsverfahren für Oelverbrauch und Blow-By zwischen Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbuchse*, Dissertation, TU Graz, 1992
45. Liu, L., *Modeling the Performance of the Piston Ring-Pack with Consideration of Non-Axisymmetric Characteristics of the Power Cylinder System in Internal Combustion Engines*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2005
46. Weimar, H.-J., *Entwicklung eines laser-optischen Messsystems zur kurbelwinkelaufgelösten Bestimmung der Ölfilmdicke zwischen Kolbenring und Zylinderwand in einem Ottomotor*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2002
47. Huygens, C., *Traité de la lumière: où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la reflexion, & dans la refraction, et particulièrement dans l'étrange refraction du Cristal d'Islande*, Pieter van der Aa, 1690
48. Planck, M., *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*, Barth-Verlag, München 1900
49. Beer, A., *Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten* in: Annalen der Physik und Chemie, 78-88, 1852
50. Jablonski, A., *Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes*, Nature 131, 839-840, 1933
51. Böcker, J., *Spektroskopie*, 1. Auflage, Vogel-Verlag, Würzburg 1997
52. Otto Stern und Volmer, M., *Über die Abklingungszeit der Fluoreszenz*, Physikalische Zeitschrift 20, 183-188, 1919
53. Li, L., *The Advances and Characteristics of High-Power Diode Laser Materials Processing*, Optics and Lasers in Engineering 34, 231-253, 2000

54. Ford, R.A.J. und Foord, C.A., *Laser-Based Fluorescence Techniques for Measuring Thin Liquid Films*, Wear 1978, 289–297, 1978
55. Dearlove, J. und Cheng, W.K., *Simultaneous Piston Ring Friction and Oil Film Thickness Measurements in a Reciprocating Test Rig*, SAE Technical Paper 952470, 1995
56. Nakayama, K., Morio, I., Katagiri, T. und Okamoto, Y., *A Study for Measurement of Oil Film Thickness on Engine Bearing by using Laser Induced Fluorescence (LIF) Method*, SAE Technical Paper 2003-01-0243, 2003
57. Poll, G., Gabelli, A., Binnington, P.G. und Qu, J., *Dynamic Mapping of Rotary Lip Seal Lubricant Films by Fluorescent Image Processing* in: B.S. Nau, Fluid Sealing, 55-77, Springer-Verlag, Dordrecht 1992
58. Sato, Y., Akihiko, T., Shigeyuki, O. und Kenya, N., *A Study of the Sealing Mechanism of Radial Lip Seal with Helical Ribs - Measurement of the Lubricant Fluid Behaviour Under Sealing Contact*, SAE Technical Paper 1999-01-0878, 1999
59. Sugimura, J., Hashimoto, M. und Yamamoto, Y., *Study of Elastohydrodynamic Contacts with Fluorescence Microscope* in: Tribology Series : Thinning Films and Tribological Interfaces Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 609–617, Elsevier-Verlag, Amsterdam 2000
60. Myant, C., Reddyhoff, T. und Spikes, H.A., *Laser-Induced Fluorescence for Film Thickness Mapping in Pure Sliding Lubricated, Compliant, Contacts*, Tribology International 43, 1960-1969, 2010
61. Hidrovo, C.H. und Hart, D.P., *Emission Reabsorption Laser Induced Fluorescence (ERLIF) Film Thickness Measurement*, Measurement Science and Technology 12, 467-477, 2001
62. Greene, A.B., *Initial Visual Studies of Piston-Cylinder Dynamic Oil Film Behaviour*, Wear 13, 345–360, 1969
63. Ting, L.L., *Development of a Laser Fluorescence Technique For Measuring Piston Ring Oil Film Thickness*, Journal of Lubrication Technology 102, 165-170, 1980
64. Hoult, D.P., Lux, J.P. und Wong, V.W., *Calibration of Laser Fluorescence Measurements of Lubricant Film Thickness in Engines*, SAE Technical Paper 881587, 1988
65. Hoult, D.P. und Takiguchi, M., *Calibration of the Laser Fluorescence Technique Compared With Quantum Theory*, Tribology Transactions 34, 440-444, 1991
66. Shaw, B.T., Hoult, D.P. und Wong, V.W., *Development of Engine Lubricant Film Thickness Diagnostics Using Fiber Optics and Laser Fluorescence*, SAE Technical Paper 920651, 1992
67. Takiguchi, M., Nakayama, K., Furuhashi, S. und Yoshida, H., *Variation of Piston Ring Oil Film Thickness in an Internal Combustion Engine - Comparison Between Thrust and Anti-Thrust Sides*, SAE Technical Paper 980563, 1998
68. Brown, M.A., McCann, H. und Thompson, D.M., *Characterization of the Oil Film Behaviour Between the Liner and Piston of a Heavy-Duty Diesel Engine*, SAE Technical Paper 932784, 1993
69. Arcoumanis, C., Duszynski, M., Lindenkamp, H. und Preston, H., *Measurements of the Lubricant Film Thickness in the Cylinder of a Firing Diesel Engine Using LIF*, SAE Technical Paper 982435, 1998

70. Inagaki, H., Saito, A., Murakami, M. und Konomi, T., *Development of Two-Dimensional Oil Film Thickness Distribution Measuring System*, SAE Technical Paper 952346, 1995
71. Mulgrave, P.M., *Development of a Laser Induced Fluorescence System for Measuring Oil Film Thickness in Two Dimensions in a Reciprocating Engine*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1997
72. Thirouard, B., Tian, T. und Hart, D.P., *Investigation of Oil Transport Mechanisms in the Piston Ring Pack of a Single Cylinder Diesel Engine, Using Two Dimensional Laser Induced Fluorescence*, SAE Technical Paper 982658, 1998
73. Thirouard, B., *Characterization and Modeling of the Fundamental Aspects of Oil Transport in the Piston Ring Pack of Internal Combustion Engines*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2001
74. Baba, Y., Suzuki, H., Sakai, Y., Wei, D.L.T., T., I. und Obokata, T., *PIV/LIF Measurements of Oil Film Behavior on the Piston in I.C. Engines*, SAE Technical Paper 2007-24-0001, 2007
75. Kato, M., Fujita, K., Suzuki, H., Yasukazu, B., Ishima, T. und Obokata, T., *Analysis of Lubricant Oil Film Behavior on the Piston Surface According with Piston Shapes by Means of LIF and PIV*, SAE Technical Paper 2009-28-0003, 2009
76. Le Coz, J.-F. und Baritaud, T., *Application of Laser Induced Fluorescence for Measuring the Thickness of Evaporating Gasoline Liquid Films* in: R.J. Adrian, et al., *Developments in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics*, 115-131, Springer-Verlag, Berlin 1996
77. Hentschel, W., Grote, A. und Langer, O., *Measurement of Wall Film Thickness in the Intake Manifold of a Standard Production SI Engine by Spectroscopic Technique*, SAE Technical Paper 972832, 1997
78. Park, S. und Ghandhi, J.B., *Fuel Film Temperature and Thickness Measurements on the Piston Crown of a Direct-Injection Spark-Ignition Engine*, SAE Technical Paper 2005-01-0649, 2005
79. Cho, H., Kim, M. und Min, K., *The Effect of Liquid Fuel on the Cylinder Liner on Engine-Out Hydrocarbon Emissions in SI Engines*, SAE Technical Paper 2001-01-3489, 2001
80. Cho, H. und Min, K., *Measurement of Liquid Fuel Film Distribution on the Cylinder Liner of a Spark Ignition Engine Using the Laser-Induced Fluorescence Technique*, *Measurement Science and Technology* 14, 975 ff, 2003
81. Wing, R.D. und Saunders, O., *Oil Film Temperature and Thickness Measurements on the Piston Rings of a Diesel Engine*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 186, 1-9, 1972
82. Dow, T.A., Schiele, C.A. und Stockwell, R.D., *Technique for Experimental Evaluation of Piston Ring—Cylinder Film Thickness*, *Journal of Lubrication Technology* 105, 353-360, 1983
83. Grice, N. und Sherrington, I., *An Experimental Investigation into the Lubrication of Piston Rings in an Internal Combustion Engine - Oil Film Thickness Trends, Film Stability and Cavitation*, SAE Technical Paper 930688, 1993
84. Golloch, R., *Untersuchungen zur Tribologie eines Dieselmotors im Bereich Kolbenring/Zylinderlaufbuchse*, Dissertation, Universität Hannover, 2001

85. Moore, S.L., *Measurement of the Ring to Liner Oil Film Thickness in a Caterpillar 1-G Diesel Engine*, SAE Technical Paper 790730, 1979
86. Mattsson, C., *Measurement of the Oil Film Thickness Between the Cylinder Liner and the Piston Rings in a Heavy Duty Directly Injected Diesel Engine*, Development 2014, 10-20, 1995
87. Shin, K., Tateishi, Y. und Furuhashi, S., *Measurement of Oil-Film-Thickness Between Piston Ring and Cylinder*, SAE Technical Paper 830068, 1983
88. Furuhashi, S., Sasaki, S. und Kojima, M., *Piston Friction Force and Piston Ring Oil Film Thickness*, SAE Technical Paper 845067, 1984
89. Denis, J., Briant, J. und Hipeaux, J.-C., *Lubricant properties analysis & testing*, Editions Technip, Paris 2000
90. Aachener Quarz-Glas Technologie Heinrich, *Materialien und Datenblätter*. www.quarzglas-heinrich.de/, 08.03.2014
91. Dobrovinskaya, E.R., Lytvynov, L.A. und Pishchik, V., *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications*, Springer-Verlag, Wien 2009
92. Wang, C.-P., Sadeghi, F., Wereley, S.T., Rateick, R.G. und Rowan, S., *Experimental Investigation of Lubricant Extraction from a Micropocket*, Tribology Transactions 54, 404-416, 2011
93. Cross, A.T., Sadeghi, F., Cao, L., Rateick, R.G. und Rowan, S., *Flow Visualization in a Pocketed Thrust Washer*, Tribology Transactions 55, 571-581, 2012
94. Nakashima, K., Ishihara, S., Urano, K. und Katsuhiro, M., *A study on Lubricating Oil Flow into the Combustion Chamber for the Top Ring with a Special Joint*, SAE Technical Paper 982441, 1998
95. Gohar, R. und Cameron, A., *The Mapping of Elastohydrodynamic Contacts* Wear 11, 215–225, 1968
96. Luo, J., Wen, S. und Huang, P., *Thin Film Lubrication Part I: Study on the Transition Between EHL and Thin Film Lubrication Using a Relative Optical Interference Intensity Technique*, Wear 194, 107–115, 1996
97. Rowe, K.G., Bennett, A.I., Krick, B.A. und Gregory Sawyer, W., *In-Situ Thermal Measurements of Sliding Contacts*, Tribology International 62, 208-214, 2013
98. Drexhage, K.H., *Structure and Properties of Laser Dyes*, 1. Auflage, Topics in applied Physics, Springer-Verlag, Wien 1973
99. Coppeta, J. und Rogers, C., *Dual Emission Laser Induced Fluorescence for Direct Planar Scalar Behavior Measurements*, Experiments in Fluids 25, 1-15, 1998
100. Shuzou Sanda, Inagaki, H., Fuyuto, T. und Noda, T., *Basic Study on Simultaneous Measurement of Oil Film Thickness and Oil Film Temperature Using Dual Fluorescence Method*, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series 64, 2653-2658, 1998
101. Hidrovo, C.H. und Hart, D.P., *Dual Emission Laser Induced Fluorescence Technique (DELIF) for Oil Film Thickness and Temperature Measurement*, AMSE/JSME Fluids Engineering Decision Summer Meeting July 2000
102. Hidrovo, C.H., Brau, R.R. und Hart, D.P., *Excitation Nonlinearities in Emission Reabsorption Laser-Induced Fluorescence Techniques*, Applied Optics 43, 894-913, 2004

103. Datenblatt, *Rhodamine 640 Perchlorate*, Exciton, 2006
104. Datenblatt, *Pyromethene 567*, Exciton, 2006
105. Young, T., *An Essay on the Cohesion of Fluids*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 95, 65-87, 1805
106. Kubiak, K.J., Wilson, M.C.T., Mathia, T.G. und Carval, P., *Wettability Versus Roughness of Engineering Surfaces*, Wear 271, 523–528, 2011
107. Kalin, M. und Polajnar, M., *The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water: The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading*, Applied Surface Science 293, 97-108, 2014
108. Gümbel, L., *Das Problem der Lagerreibung*, Mitteilungsblatt des Berliner Bezirksvereins Deutscher Ingenieure (VDI) 87-104, 109-120, 1914
109. Herrmann, K., *Härteprüfung an Metallen und Kunststoffen: Grundlagen und Überblick zu modernen Verfahren; mit 66 Tabellen*, Expert-Verlag, Reinningen 2007